

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivana Martić**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Ivana Martić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečenaznanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebna zahvala mentorici prof.dr.sc. Nastiji Degiuli na pomoći i podršci te ukazanom povjerenju.

Zahvaljujem i mr.sc. Marti Pedišić Buča na materijalima koji su bili potrebni za izradu ovog rada te asistentu dipl.ing. Ivanu Muniću na pomoći pri radu sa računalnim programom.

Hvala i mojim roditeljima koji su mi omogućili sve što sam do sada postigla.

Ivana Martić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
1. OPLAKANA POVRŠINA .....	1
1.1. Uvod.....	1
1.2. Određivanje oplakane površine korištenjem 2D fotografija i 3D objekta modela broda .....	2
1.2.1. Usporedba rezultata "Live-wire" metode i ručno određene vodne linije.....	5
1.3. Ostale metode određivanja oplakane površine .....	6
2. ANALIZA MOGUĆIH IZVORA GREŠAKA PRILIKOM MODELSKOG ISPITIVANJA .....	9
2.1. Izvori grešaka i njihov utjecaj na određivanje oplakane površine .....	9
2.1.1. Geometrija modela.....	9
2.1.1.1. Masa modela/istisnine.....	10
2.1.2. Instalacija modela .....	12
2.1.3. Kalibracija instrumentarija.....	12
2.1.4. Mjerenja .....	13
2.1.4.1. Ukupni otpor .....	13
2.1.4.2. Brzina.....	13
2.1.4.3. Bočni nagib i trim .....	14
2.1.5. Obrada podataka .....	14
2.1.5.1. Dominantne komponente analize netočnosti .....	14
3. ANALIZA UTJECAJA POGREŠKE OČITANJA OPLAKANE POVRŠINE NA VRIJEDNOST OTPORA BRODA.....	16
3.1. Modeliranje forme trupa modela.....	16
3.2. Određivanje vodne linije .....	17
3.3. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela .....	18
3.3.1. Sustavno variranje očitavanja cijele vodne linije .....	18
3.3.2. Sustavno variranje očitavanja dijela vodne linije na pramcu .....	24
3.4. Preračunavanje rezultata s modela na brod.....	30
4. UTJECAJ DINAMIČKE OPLAKANE POVRŠINE NA OTPOR KATAMARANA....	41
5. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1.1 Fotografije bazenskog ispitivanja .....	2
Slika 1.2 Primjena metode „live-wire“ u određivanju vodne linije s podvodne fotografije modela broda .....	4
Slika 1.3 Prolazak zrake iz fokusa kamere kroz površinu trupa .....	5
Slika 1.4 Projicirana vodna linija na površini modela .....	5
Slika 1.5 Vizualna usporedba vodne linije određene „live-wire“ metodom i ručno .....	6
Slika 3.1 Nacrt rebara modela .....	17
Slika 3.2 3D model trupa .....	17
Slika 3.3.a) Fotografija ispitivanja modela pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	18
Slika 3.3.b) Fotografija ispitivanja modela pri brzini $v_M=6,594$ m/s .....	18
Slika 3.4 Vodna linija modela pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	19
Slika 3.5 Pomaknuta vodna linija modela pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	19
Slika 3.6 Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otporamodela pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	21
Slika 3.7 Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otporamodela pri brzini $v_M=6,594$ m/s .....	23
Slika 3.8 Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine za obje brzine .....	23
Slika 3.9 Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja vodne linije za obje brzine .....	24
Slika 3.10 Deflektori vodene prašine .....	26
Slika 3.11 Pomaknuti pramčani dio vodne linije pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	26
Slika 3.12 Grafički prikaz utjecaja netočnosti pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otporamodela pri brzini $v_M=5,002$ m/s .....	27
Slika 3.13 Grafički prikaz utjecaja netočnosti pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otporamodela pri brzini $v_M=6,594$ m/s .....	28
Slika 3.14 Usporedba utjecaja netočnosti pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora za obje brzine .....	29
Slika 3.15 Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine modela na silu ukupnog otpora broda pri brzini $v_S=9,352$ m/s .....	33
Slika 3.16 Grafički prikaz utjecaja netočnosti pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora pri brzini $v_S=9,352$ m/s .....	35
Slika 3.17 Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine modela na silu ukupnog otpora broda pri brzini $v_S=12,335$ m/s .....	37
Slika 3.18 Grafički prikaz utjecaja netočnosti pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora ( $v_S=12,335$ m/s) .....	39

Slika 3.19 Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja vodne linije na silu ukupnog otpora broda za obje brzine .....	40
---	----

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela( $v_M=5,002$ m/s) .....	21
Tablica 3.2 Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela( $v_M=6,594$ m/s) .....	22
Tablica 3.3 Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora modela( $v_M=5,002$ m/s) .....	27
Tablica 3.4 Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linijena netočnost koeficijenta ukupnog otporamodela( $v_M=6,594$ m/s) .....	28
Tablica 3.5 Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_S=9,352$ m/s) .....	32
Tablica 3.6 Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora broda( $v_S=9,352$ m/s) .....	34
Tablica 3.7 Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_S=12,335$ m/s) .....	36
Tablica 3.8 Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_S=12,335$ m/s) .....	38

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\nabla f$		gradijent funkcije
$C$		funkcija cijene
$w$		konstanta težine
$C_T$		koeficijent ukupnog otpora
$R_T$	N	ukupni otpor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća vode
$S$	m <sup>2</sup>	oplakana površina
$V$	m/s	brzina
$L$	m	duljina
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	koeficijent kinematičke viskoznosti
$g$	m/s <sup>2</sup>	ubrzanje sile teže
$\nabla$	m <sup>3</sup>	volumen istisnine
$u$		netočnost
$\Delta$	kg	masa istisnine
$t$	°C	temperatura
$A_w$	m <sup>2</sup>	površina vodne linije
$\kappa$		koeficijent
$\kappa L_{WL}$	m	promijenjena vodna linija
SEE		standardna devijacija
$n$		broj uzoraka; broj impulsa
$R_i$	N	sila otpora pojedinog uzorka
$S_{RT}$		standardna devijacija uzorka
$D$	m	promjer kola
$p$		broj impulsa
$\Delta t$	s	vremenski interval
$p_{\%}$		postotna pogreška
$p_a$		apsolutna pogreška
$x_{mj}$		očitana vrijednost mjerne veličine
$x_p$		mjerodavna vrijednost
$C_F$		koeficijent otpora trenja
$C_R$		koeficijent preostalog otpora
$Rn$		Reynoldsov broj
$\Delta C_T$		korelacijski dodatak
$\lambda$		mjerilo geometrijske sličnosti



$R_S$	N	otpor vodene prašine
$R_{SP}$	N	viskozni otpor vodene prašine
$R_{SF}$	N	otpor trenja vodene prašine
$Wb$		Weberov broj
$v_{SR}$	m/s	brzina vodene prašine
$d_{SR}$	m	debljina vodene prašine
$T_S$	N/m	površinska napetost
$R_{SR}$	N	otpor deflektora vodene prašine
$R_{SRP}$	N	viskozni otpor deflektora vodene prašine
$C_{T\ cat}$		koeficijent ukupnog otpora katamarana
$\beta$		faktor interferencije
$k$		faktor forme
$C_{F\ mon}$		koeficijent otpora trenja jednog trupa
$\tau$		faktor interferencije valova
$C_{W\ mon}$		koeficijent otpora valova jednog trupa
$w$		omjer dinamičke i statičke oplakane površine
$s$	m	razmak između trupova katamarana

## SAŽETAK

U radu je definiran utjecaj dinamičke oplakane površine na konačne vrijednosti ukupnog otpora broda poludeplasmanske forme. Dan je prikaz metoda pomoću kojih se s određenom točnošću može odrediti iznos dinamičke oplakane površine pri nekoj brzini. Detaljnije je opisan postupak određivanja oplakane površine modela analizom fotografija bazenskog ispitivanja.

Navedeni su i analizirani faktori koji mogu utjecati na netočnost rezultata modelskih ispitivanja.

Na temelju nacрта rebara modela, generiran je, pomoću programa Rhino 4.0, 3D model poludeplasmanske forme trupa broda ispitane u Brodarskom institutu u Zagrebu. Analiziran je utjecaj netočnosti određivanja dinamičke oplakane površine na vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora modela broda za dvije različite brzine.

Dobiveni podaci ekstrapolirani su Froudeovom metodom na brod u naravi kako bi se odredio utjecaj netočnosti određivanja oplakane površine na silu ukupnog otpora broda.

# 1. OPLAKANA POVRŠINA

## 1.1. Uvod

Otpor broda određen modelskim ispitivanjem u bazenu dijeli se na dvije komponente: otpor trenja i preostali otpor.

Otpor trenja kao najveća komponenta ukupnog otpora izravno je povezan s oplakanom površinom modela odnosno broda. Kod deplasmanskih formi oplakana površina koja se generira pri nekoj brzini obično se ne razlikuje bitno od one na mirnoj vodi, no kod poludeplasmanskih i gliserskih formi oplakana površina se drastično mijenja s porastom brzine. Zato je potrebna što veća točnost prilikom određivanja oplakane površine ispitivanog modela kako bi se što točnije odredio ukupni otpor broda, a samim time i zahtijevana snaga za postizanje određene brzine.

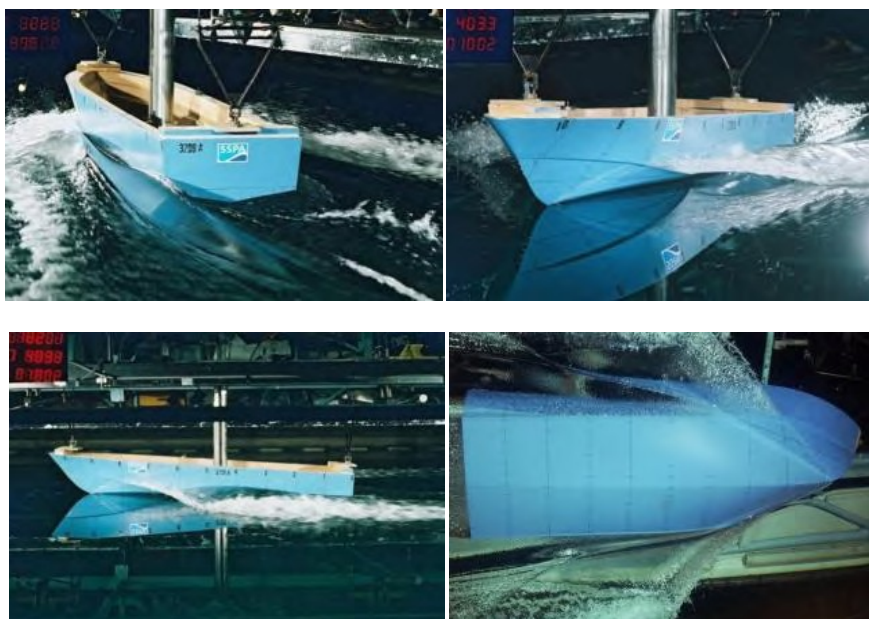
Poludeplasmanske forme generiraju i hidrostatički i hidrodinamički uzgon: pri malim brzinama ponašaju se kao deplasmanske forme, a porastom brzine stvara se hidrodinamički uzgon, smanjuje se duljina vodne linje i mijenja se oblik podvodnog dijela trupa broda.

Froudeov broj na temelju istisnine  $Fn_{\nabla}$  za poludeplasmanske forme iznosi

$$1,0 - 1,3 < Fn_{\nabla} < 2,7 - 3,3.$$

Iako je potrebna točnost prilikom određivanja oplakane površine poludeplasmanskih i gliserskih formi manja nego kod deplasmanskih, kojima je najveća komponenta ukupnog otpora upravo otpor trenja, potrebno je znati koliko će greška u očitanju utjecati na predviđenu konačnu snagu broda.

Najuobičajenija metoda koja se koristi je kombinacija analize podvodnih i nadvodnih fotografija bazenskog ispitivanja. Fotografije koje se koriste su fotografije boka modela, pramca i krme, te podvodna fotografija, slika 1.1. Točnost ove metode ovisi isključivo o vještini i iskustvu osobe koja to radi.



Slika 1.1 Fotografije bazenskog ispitivanja [1]

Procijenjena netočnost prilikom određivanja oplakane površine analiziranjem nadvodnih i podvodnih fotografija iznosi 5 % izračunate vrijednosti, što znači da će vrijednost otpora trenja imati netočnost od 0,5 % [1].

## 1.2. Određivanje oplakane površine korištenjem 2D fotografija i 3D objekta modela broda

Proces započinje određivanjem vodne linije s fotografijama i kalibracijom kamere kako bi se vodna linija mogla projicirati na 3D model.

Crtanjem segmenata vodne linije na fotografijama može se ručno odrediti njen oblik, no to zahtijeva mnogo truda i vremena, a oblik vodne linije ovisit će o vještini osobe koja ju je određivala.

Umjesto toga, vodna linija se određuje na polu automatizirani način odnosno tzv. „live-wire“ metodom [2]. „Live-wire“ tehnologija koja se naziva još i „pametne škare“, tehnologija je segmentacije fotografija i temelji se na algoritmu funkcije najmanje cijene (eng. *lowest cost function*), slika 1.2. Fotografiju je najprije potrebno obraditi tzv. Sobel filtrom [3] koji detektira rubove na slici pomoću gradijenta skalarnog polja odnosno vektorskog polja koje pokazuje u smjeru najvećeg porasta skalarnog polja.

Gradijent dvovarijabilne funkcije (kao što je funkcija intenziteta slike) je 2D vektor u svakoj točki slike opisan derivacijama funkcije u horizontalnom i vertikalnom smjeru:

$$\text{grad}f = \partial f / \partial x \vec{i} + \partial f / \partial y \vec{j} \quad (1.1)$$

gdje je:

- $f$  - dvovarijabilna funkcija,
- $\vec{i}$  - jedinični vektor u smjeru osi  $x$ ,
- $\vec{j}$  - jedinični vektor u smjeru osi  $y$ .

U svakoj točki fotografije Sobel operator je vektor gradijenta (ili normala na taj vektor) koji je usmjeren prema najvećem mogućem intenzitetu, a duljina vektora pokazuje jačinu promjene nijanse (intenziteta) u tom smjeru. Sobel koristi vrijednosti intenziteta u području  $3 \times 3$  točke oko svake točke slike, sciljem da aproksimira odgovarajući gradijent. Drugim riječima računalo pronalazi prijelaze između svijetlih i tamnih dijelova fotografije, određuje sam intenzitet tog prijelaza i tako detektira rub i njegovu orijentaciju.

Algoritmom najmanje cijene pronalazi se najkraća udaljenost između dvije točke koje korisnik odredi. Najprije se klikom miša označi početni željeni pixel, a prelaskom miša preko ostalih pixela algoritam traži najmanju udaljenost među njima. Nakon što se potvrdi odabrani put ponovnim klikom miša, ta točka postaje početna. Što su kraći segmenti između točaka - točnost je veća. Definiše se funkcija cijene prelaska linije preko ruba, a različite funkcije rezultirat će različitim najkraćim putevima između točaka, te samim time će se i vodna linija razlikovati.

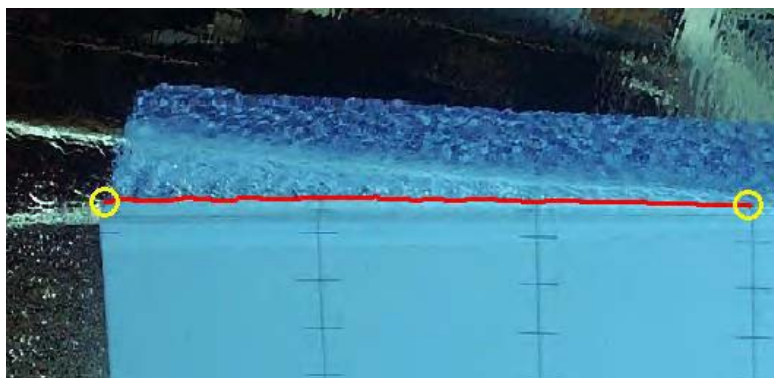
Oblik funkcije cijene od pixela  $p$  do pixela  $q$  dan je izrazom:

$$C(p, q) = w_G f_G(q) + w_D f_D(p, q) \quad (1.2)$$

gdje je:

- $f_G(q)$  - jačina boje gradijenta na slici,
- $f_D(p, q)$  - smjer gradijenta boje,
- $w_G, w_D$  - "konstante težine".

Svaki uvjet cijene određen je pomoću konstante težine koja omogućuje doprinos svih uvjeta ukupnoj cijeni.



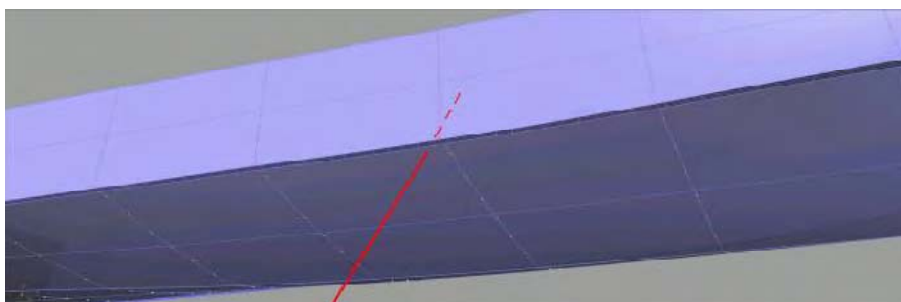
**Slika 1.2 Primjena metode „live-wire“ u određivanju vodne linije s podvodne fotografije modela broda [1]**

Podvodne fotografije modela prilikom ispitivanja u bazenu od najveće su koristi za određivanje oplakane površine, jer daju kompletnu sliku vodne linije pri određenoj brzini.

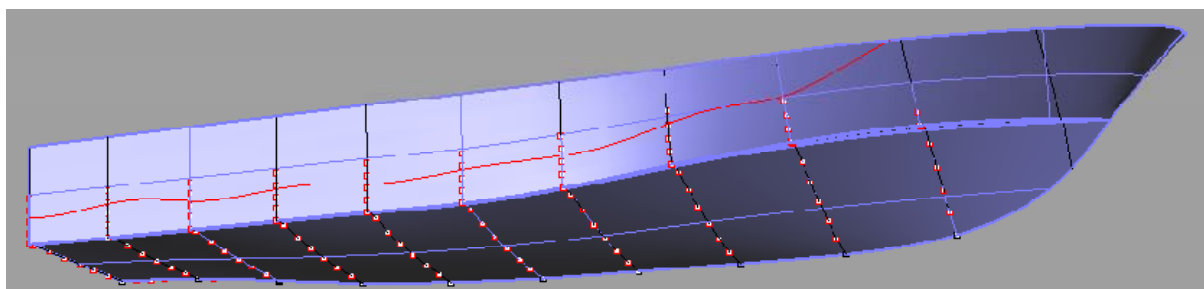
No prilikom analiziranja takvih fotografija mogu se pojaviti stanoviti problemi. Primjerice kod nekih oblika brodova (V oblik rebara, brodovi sa zgibom) pri većim brzinama vodna linija se ne vidi jasno zbog mjehurića zraka koji se stvaraju ispod slobodne površine [4]. Isto tako ako je oblik trupa na nekim mjestima vertikaln ili vrlo strm, teško je odrediti točnu visinu vodne linije. U takvom slučaju netočnost očitavanja od jednog pixela može rezultirati velikom devijacijom vodne linije na trupu modela [4]. Zato je vrlo važno uspoređivati fotografije kamere montiranih na različitim pozicijama kako bi se položaj vodne linije što točnije odredio.

Nakon određivanja vodne linije sa 2D fotografija, potrebno je projicirati dobivenu vodnu liniju na 3D model. To se postiže kalibracijom kamere odnosno određivanjem točne pozicije i perspektive kamere. Na temelju specifikacija kamere proračunava se matrica projekcije i traže se presjecišta zraka kamere i površine modela, slika 1.3.

Presjecišta daju koordinate točaka vodne linije čijim se spajanjem dobije oblik vodne linije na površini modela, slika 1.4.



Slika 1.3 Prolazak zrake iz fokusa kamere kroz površinu trupa [1]



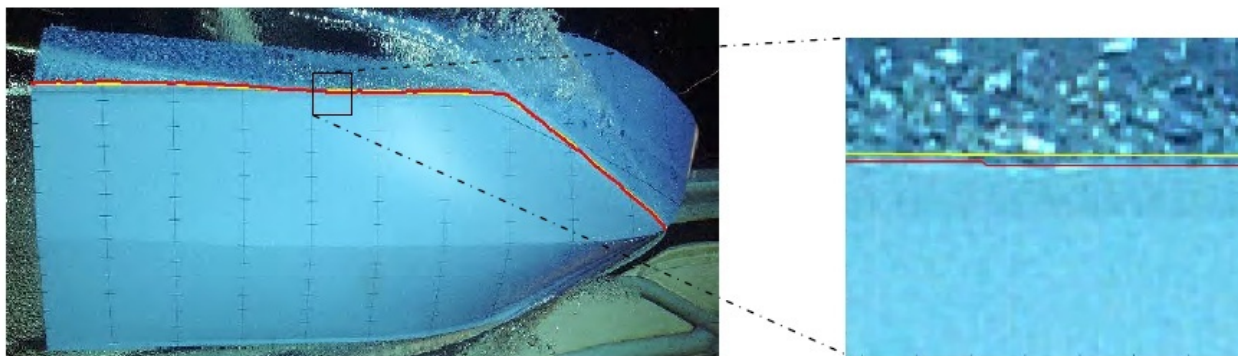
Slika 1.4 Projicirana vodna linija na površini modela [4]

Nakon što je određen oblik vodne linije površina modela može se podijeliti na podvodni i nadvodni dio, a 3Dsoftware određuje iznos oplakane površine.

#### ***1.2.1. Usporedba rezultata „Live-wire“ metode i ručno određene vodne linije***

Na slici 1.5 prikazana je vodna linija koju je ručno odredio stručnjak (žuta linija) i ona koja je određena „live-wire“ tehnologijom (crvena linija).

Iako se na prvi pogled te dvije linije preklapaju, povećavanjem su vidljiva određena odstupanja. Daljnom analizom tih dviju linija [1] utvrđeno je da je više od 50% točaka udaljeno manje od 2 pixels, a sve točke (100% točaka) međusobno su udaljene za manje od 6 pixels.



**Slika 1.5 Vizualna usporedba vodne linije određene „live-wire“ metodom (crvena linija) i ručno (žuta linija) [1]**

Modifikacijama parametara „live-wire“ metoda može se podesiti tako da odgovara različitim tipovima broda. No na dijelovima gdje uslijed mjehurića vodna linija nije dovoljno izražena ta metoda neće dati zadovoljavajuće rezultate pa je potrebno primjeniti ručnu metodu.

Pokazalo se da određivanje oplakane površine analiziranjem podvodnih i nadvodnih fotografija daje zadovoljavajuće rezultate u smislu brzine i učinkovitosti procesa, cijene te točnosti.

### 1.3. Ostale metode određivanja oplakane površine

Cilj je u novije vrijeme razviti metodu koja bi zamijenila ručni dio određivanja oplakane površine s automatskim procesuiranjem fotografija i vizualizacijom rezultata. To je zadatak kojim su se bavili stručnjaci u okviru europskog projekta „Hydro Testing Alliance Joint Research Project No. 8“ [1].

Predložene metode temeljile su se na većoj efikasnosti i kraćem potrebnom vremenu rada od dosadašnjih, te većoj ili jednakoj točnosti pri određivanju oplakane površine.

Slijedi kratki pregled ostalih metoda.

**Premaz na modelu**(eng. *Responsive coating*) – tanak sloj boje se nanosi uređajem za tlačno prskanje koji iz spremnika usisava zrak i tlači ga na visoki tlak. Tako stlačeni premaz ekspandira u mlaznici u fine čestice usmjerenog mlaza i prekriva podvodni dio modela ili



njegove kritične dijelove. Tegljenjem modela kroz bazen ispire se boja s podvodnog dijela modela i na taj način se određuje oplakana površina. Postupak bi trebalo ponoviti za svaku pojedinu brzinu ispitivanja. No većina bazena nema tako razvijenu tehnologiju, a troškovi ove metode su veliki.

**Direktno mjerenje visine vode duž trupa broda** (eng. *Direct measurment of water elevation along the ship hull*) – koriste se kondenzatorske trake koje mjere visinu vode duž trupa broda. Princip se temelji na paralelnom spoju kondenzatora tj. na temelju njihove kapacitivnosti. Voda ima manju konstantu električnog otpora od zraka te kondenzatoru koji je pod vodom električni kapacitet raste. Potrebno je postaviti više takvih traka u uzdužnom smjeru i na dno trupa broda ili premazati cijeli trup najprije metalnim premazom pa zatim izolacijskim premazom kako bi u dodiru s vodom nastala kondenzatorska ploča. Same trake mogu utjecati na strujanje tekućine, te ne raspoznaju razliku između same tekućine i vodene maglice. Potrebna je velika točnost u postavljanju traka duž trupa broda što oduzima mnogo vremena, a dodatni nedostatak metode su veliki troškovi.

**Određivanje oplakane površine radarom** (eng. *Radar measurement*) – teoretski moguća i praktična metoda, no javljaju se problemi prilikom instalacije potrebne opreme na postojeću opremu kolica u bazenima za ispitivanje. Radari daju pouzdana mjerenja, no potrebno je detaljno analizirati fizikalne pojave na kojima se temelji mjerenje odnosno podesiti sustav. Mjerni sustav sastoji se od odašiljača, antene, staze putanje vala i prijemnika te mjeri vrijeme potrebno signalu od trenutka odašiljanja do prijema. Vrijeme prolaska signala kroz tekućinu dulje je od vremena prolaska kroz zrak. Ovisno o tom vremenu, a poznavajući brzinu prolaza signala kroz tekućinu, može se odrediti razina vode.

**Brojač rešetkastih ćelija** (eng. *Grid cell counter*) – metoda se temelji na označavanju rešetkastih ćelija jednakih površina na modelu ili punih polja različite boje poput šahovske ploče. Procesuiranjem podvodnih fotografija, te preciznim radom uz pomoć mjernih instrumenata moguće je odrediti broj ćelija pod vodom odnosno oplakanu površinu. No označavanje polja jednakih dimenzija dugotrajan je i skup proces.

Iako je cilj projekta „Hydro Testing Alliance Joint Research Project No. 8“ [1] bio razviti metodu koja bi u potpunosti automatizirala proces određivanja vodne linije i oplakane površine, zaključak je da je to ipak bilo nerealno za očekivati. Potrebno je usavršiti metodu što veće točnosti uz minimalan ljudski napor.

## 2. ANALIZA MOGUĆIH IZVORA GREŠAKA PRILIKOM MODELSKOG ISPITIVANJA

### 2.1. Izvori grešaka i njihov utjecaj na određivanje oplakane površine

Ispitivanjem modela broda u bazenu utvrđuje se veza između koeficijenta preostalog otpora  $C_R$  te Froudeovog broja, a po potrebi i faktora forme  $k$ . Otpor broda  $R_T$  mjeri se dinamometrom za određeni raspon brzina, kako bi se odredio koeficijent ukupnog otpora  $C_T$  koji uz silu otpora ovisi o gustoći, brzini modela te oplakanoj površini.

Pomoću rezultata ispitivanja modela tegljenjem kroz bazen može se odrediti otpor broda za svaku pojedinu brzinu. No potrebno je provesti analizu mogućih faktora koji bi utjecali na netočnost rezultata modelskih ispitivanja.

Prema određenim ITTC procedurama provedbe pokusa otpora [5], a sa stajališta analize netočnosti, cijeli je sustav provedbe pokusa otpora i mjerenja podijeljen u 5 skupina:

- 1) geometrija,
- 2) instalacija modela,
- 3) kalibracija,
- 4) mjerenje,
- 5) obrada podataka.

#### 2.1.1. Geometrija modela

Model se generira iz 2D nacrtu ili matematičkog opisa forme trupa i uvijek može doći do greške budući ni jedan proces generiranja i izrade forme broda nije savršen. Pretpostavka je da geometrija modela može imati točnost  $\pm 1$  mm u smjeru svake koordinatne osi i ako ta tolerancija nije premašena nije potrebna dodatna analiza utjecaja netočnosti geometrije trupa. Također prilikom samog ispitivanja može doći do deformacije modela uslijed statičkih opterećenja. Poželjno je napraviti što veći model, koliko to dimenzije bazena dopuštaju, kako bi kasnija pogreška preračunavanja rezultata s modela na brod bila što manja.

Iako greška geometrije modela indirektno preko oplakane površine utječe na ukupni otpor modela, općenito ne postoji analitička formula koja to povezuje.

Duljina modela  $L$  ulazi kao parametar u izraze za Reynoldsov i Froudeov broj:

$$Rn = VL/\nu \quad (2.1)$$

$$Fn = V/\sqrt{gL} \quad (2.2)$$

gdje je:

$V$  - brzina, m/s,

$L$  - duljina, m,

$\nu$  - koeficijent kinematičkeviskoznosti, m<sup>2</sup>/s,

$g$  - ubrzanje sile teže, m/s<sup>2</sup>,

a njezina karakteristična vrijednost se obično procjenjuje preko volumena istisnine modela broda prema izrazu:

$$L \propto \sqrt[3]{V} \quad (2.3)$$

gdje je:

$V$  - volumen istisnine trupa modela broda, m<sup>3</sup>.

Relativna netočnost duljine  $u(L)$  može se aproksimirati kao:

$$u(L)/L = u(V)/(3V) \quad (2.4)$$

gdje se netočnost istisnine  $u(V)$  određuje empirijski.

Dimenzije trupa modela mogle bi se s velikom točnošću odrediti 3D laserskim skenerom, što bi uvelike olakšalo i određivanje oplakane površine, no većina bazena ne posjeduje tako sofisticiranu opremu.

#### 2.1.1.1. Masa modela/istisnine

Ispitivanje modela provodi se na nominalnoj težini uz točnost mase modela  $\pm 1,0$  kg.

Masa modela odnosno masa istisnine određuje se prema slijedećem izrazu:

$$\Delta = V\rho(t) \quad (2.5)$$

gdje je:

$\Delta$  - masa modela, kg,

$\rho$  - gustoća vode, kg/m<sup>3</sup>,

$t$  - temperatura vode u bazenu tijekom ispitivanja, °C.

Ako je stvarna gustoća vode u bazenu različita od izračunate, mijenja se volumen istisnine odnosno gaz modela  $T$  za isti iznos težine modela:

$$\delta V / V = -\delta \rho / \rho \quad (2.6)$$

Tada se promjena gaza  $\delta T$  i oplakane površine  $\delta S$  može aproksimirati prema izrazima:

$$\delta T = \delta V / A_w \quad (2.7)$$

$$\delta S = (\kappa L_{WL}) \delta T = -[\kappa L_{WL} / A_w](\delta V) \quad (2.8)$$

gdje je:

$\kappa L_{WL}$  - promijenjena duljina vodne linije, m,

$\kappa$  - koeficijent,  $\kappa > 2$ ,

$A_w$  - površina vodne linije, m<sup>2</sup>.

Netočnost oplakane površine uzrokovana promjenom gustoće vode definirana je kao:

$$u(S) = (\kappa L_{WL} V / A_w)(u(\rho) / \rho) \quad (2.9)$$

gdje je  $u(\rho)$  netočnost gustoće, kg/m<sup>3</sup>.

Na ukupnu pogrešku oplakane površine utječu još i netočnosti balastiranja modela, postavljanja trima i gaza, no te je faktore teško dovesti u relaciju s oplakanom površinom.

Slično kao što se određuje pogreška uslijed promjene gustoće, tako se može aproksimirati i pogreška uslijed balastiranja modela:

$$u(S) = (\kappa L_{WL} V / A_w)(u(\Delta) / \Delta) \quad (2.10)$$

gdje je  $u(\Delta)$  netočnost mase.

Ukupna netočnost oplakane površine  $u(S)$  dobije se kao kombinacija netočnosti gustoće i mase prema jednadžbi:

$$u(S) = (\kappa L_{WL} V / A_w) \sqrt{(u(\Delta) / \Delta)^2 + (u(\rho) / \rho)^2} \quad (2.11)$$

### 2.1.2. Instalacija modela

Utjecaj instalacije modela na mehanizam dinamometra za mjerenje otpora je vrlo složen i netočnosti se jedino mogu procijeniti iz pouzdanih serija podataka prijašnjih ispitivanja. Bilo kakve pogreške u postavljanju modela rezultirat će odstupanjima u mjerenju otpora, trimom ili nagibom modela.

### 2.1.3. Kalibracija instrumentarija

Sustav je prije ispitivanja potrebno kalibrirati odnosno usporediti mjerni sustav sa standardiziranim sustavom kako bi se smanjila sistemska pogreška.

Netočnosti kalibracije odnose se na termometar za mjerenje temperature vode u bazenu, na vagu za određivanje mase modela, senzorske uređaje, dinamometar za mjerenje otpora, uređaje za mjerenje trima itd. Ukupnu netočnost potrebno je odrediti procesom kalibracije neovisno o pokusu otpora. Podaci mjerenja se bilježe i direktno primjenjuju u pokusu otpora modela. Relativna netočnost sile  $u_1(F)/F$  definirana je kao:

$$u_1(F)/F = \sqrt{(u_m/m)^2 + (u_g/g)^2} \quad (2.12)$$

gdje je:

$u_1(F)$  - netočnost sile, N,

$F$  - sila, N,

$m$  - masa, kg,

$g$  - ubrzanje sile teže,  $\text{m/s}^2$ ,

$u_m$  - netočnost mase, kg,

$u_g$  - netočnost ubrzanja sile teže (do 0,1%),  $\text{m/s}^2$ .

Netočnost mase  $u_m$  definira se kao:

$$u_m = \sum_{i=1}^n u_i \quad (2.12a)$$

gdje je  $u_i$  netočnost pojedine komponente težine, kg.

Netočnost koja se može javiti prilikom kalibracije instrumentarija određuje se linearnom regresijskom analizom prema izrazu:

$$u_2(F) = \text{SEE} \quad (2.13)$$

gdje je SEE standardna devijacija prema kalibracijskoj krivulji linearne regresijske analize (statistička metoda određivanja jednadžbe koja najbolje opisuje mjerne podatke metodom najmanjih kvadrata).

Ukupna netočnost kalibracije može se odrediti iz izraza:

$$u(F) = \sqrt{u_1^2(F) + u_2^2(F)} \quad (2.14)$$

#### 2.1.4. Mjerenja

##### 2.1.4.1. Ukupni otpor

Otpor se mjeri pomoću tzv. DAS (Data Acquisition System) sustava na način da se zabilježeni signal tokom mjerenja pretvara u numeričke vrijednosti koje se mogu obraditi računalno.

Pri određenoj brzini DAS osrednjuje vremenske razmake između signala u određenom intervalu  $\Delta t$ :

$$\overline{R_T} = (1/n) \sum_{i=1}^n R_i \quad (2.15)$$

gdje je:

$n$  - broj uzoraka,

$R_i$  - sila otpora pojedinog uzorka,  $N_i$ .

Netočnost te metode određuje se prema:

$$u_{R_T} = s_{R_T} / \sqrt{n} \quad (2.16)$$

gdje je  $s_{R_T}$  standardna devijacija određena iz otpora pojedinog uzorka  $R_i$ .

##### 2.1.4.2. Brzina

Brzina je jedan od najvažnijih parametara u obradi podataka nakon ispitivanja modela. Kod većine kolica brzina  $V$  je određena preko rotacije metalnog kola koje ima optički senzor (čiji se binarni izlaz koristi kao izvor impulsa) ili neki drugi uređaj koji generira impuls tako da slijedi:

$$V = n\pi D / (p\Delta t) \quad (2.17)$$

gdje je:

$V$  - brzina modela, m/s,

$n$  - broj impulsa,

$D$  - promjer kola, m,

$p$  - broj impulsa po jednom okretaju uređaja koji stvara impulse,

$\Delta t$  - vremenski interval.

Netočnost u određivanju brzine modela  $u_V$  može se izraziti kao:

$$u_V/V = \sqrt{(u_D/D)^2 + (u_n/n)^2 + (u_{\Delta t}/\Delta t)^2} \quad (2.18)$$

gdje je:

$u_D$  - netočnost promjera kola, m,

$u_n$  - netočnost broja impulsa,

$u_{\Delta t}$  - netočnost vremenskog intervala, s.

#### 2.1.4.3. Bočni nagib i trim

Bočni nagib i trim tijekom ispitivanja modela izravno utječu na oplakanu površinu trupa, a može ih uzrokovati nepravilno pozicioniranje odnosno instalacija modela. Posljedica toga je interakcija između bočnog nagiba i trima modela te sile otpora. No ne postoji analitička formula kojom bi se izrazila ta interakcija.

### 2.1.5. Obrada podataka

#### 2.1.5.1. Dominantne komponente analize netočnosti

Kod provođenja analize netočnosti modelskog ispitivanja bilježe se svi izvori i komponente pogrešaka. Analizira se svaka komponenta posebno, pridaje joj se važnost i na koncu se određuje ukupna netočnost. No u većini slučajeva relevantne su samo dvije najvažnije komponente pomoću kojih se određuje ukupna netočnost određenog rezultata mjerenja.



Važno je zbog jednostavnosti analize poznavati koje komponente su najvažnije za proračun, odnosno koje komponente se mogu zanemariti ako ne utječu uvelike na konačne rezultate. Primjerice komponentu netočnosti  $U_i$  možemo zanemariti ako je u slijedećem odnosu sa dominantnom komponentom  $U_0$ :

$$U_i < 1/3U_0 \quad (2.19)$$

Netočnosti koeficijenta ukupnog otpora može se izraziti kao:

$$(u_{C_T}/C_T)^2 = [(u_t \partial \rho / \partial t) / \rho]^2 + (2u_V/V)^2 + (u_{R_T}/R_T)^2 + (u_S/S)^2 \quad (2.20)$$

Netočnost Froudeovog i Reynoldsovog broja mogu se prikazati kao:

$$(u_{F_n}/F_n)^2 = (u_V/V)^2 + (0,5u_L/L)^2 + (0,5u_g/g)^2 \quad (2.21)$$

$$(u_{R_e}/R_n)^2 = (u_V/V)^2 + (u_L/L)^2 + (u_t \partial v / \partial t) / v)^2 \quad (2.22)$$

Netočnost koeficijenta otpora trenja definirana je izrazom:

$$(u_{C_F}/C_F)^2 = (2\log_{10} R_n)(u_{R_e}/R_n)(\log_{10} R_n - 2) \quad (2.23)$$

Netočnost koeficijenta preostalog otpora dana je izrazom:

$$u_{C_R} = \sqrt{(u_{C_T})^2 + (u_{C_F})^2} \quad (2.24)$$

Da bi se što točnije utvrdila netočnost mjerenja prema ITTC preporukama provodi se 5 setova ispitivanja pri 3 različite brzine odnosno ukupno 15 mjerenja. Na taj način uključuju se i neke nasumične pogreške koje nisu predviđene.

Ukupna netočnost modelskog ispitivanja može dovesti do odstupanja koeficijenta ukupnog otpora  $C_T$  za 0,67% ako se provodi više pokusate 1,18% ako se provodi jedan pokus [5].

Ukupna netočnost ovisi o svim komponentama bazenskog ispitivanja i potrebno ju je uključiti u samo ispitivanje i obradu podataka.

### 3. ANALIZA UTJECAJA POGREŠKE OČITANJA OPLAKANE POVRŠINE NA VRIJEDNOST UKUPNOG OTPORA BRODA

#### 3.1. Modeliranje forme trupa modela

Analiziran je model višenamjenske brodice ispitane u Brodarskom institutu u Zagrebu [6].

Osnovne karakteristike modela su:

$L_{WL} = 2,5237 \text{ m}$	- duljina između okomica,
$B = 0,8306 \text{ m}$	- širina na središnjem presijeku,
$T = 0,1686 \text{ m}$	- gaz,
$S = 2,0168 \text{ m}$	- oplakana površina na ravnoj vodnoj liniji,
$\nabla = 0,1706 \text{ m}^3$	- volumen istisnine,
$C_B = 0,4843 \text{ m}^3$	- koeficijent punoće forme.

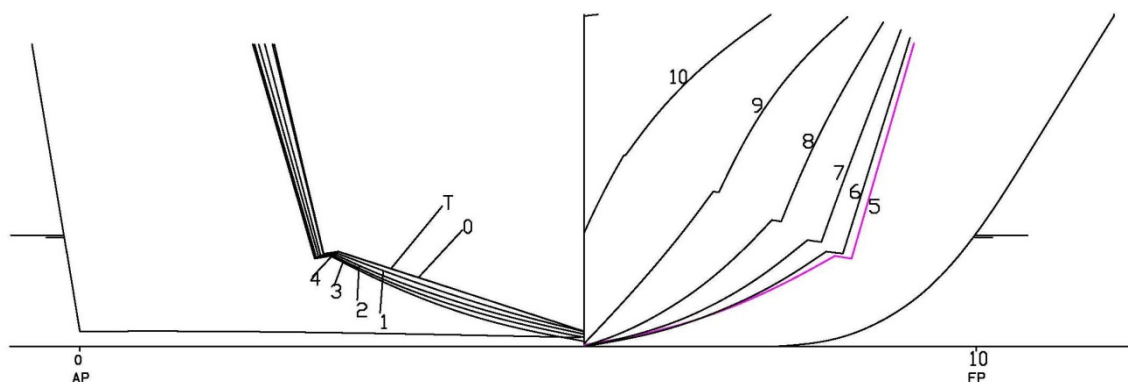
Model je izrađen od drva (vodootporne šperploče) u mjerilu  $\lambda=3,5$ .

Model broda, dinamički i statički izbalansiran, tegljen je kolicima vučnom silom položenom u smjeru djelovanja poriva. Pri konstantnoj brzini tegljenja mjerena je sila tegljenja, kut trima u plovidbi te vertikalni pomak, odnosno uron i izron na poziciji težišta istisnine. U toku pokusa model je sniman video kamerom. Iz video snimaka dobiveni su podaci za određivanje dinamičkih duljina i oplakanih površina pomoću kojih je proveden proračun otpora.

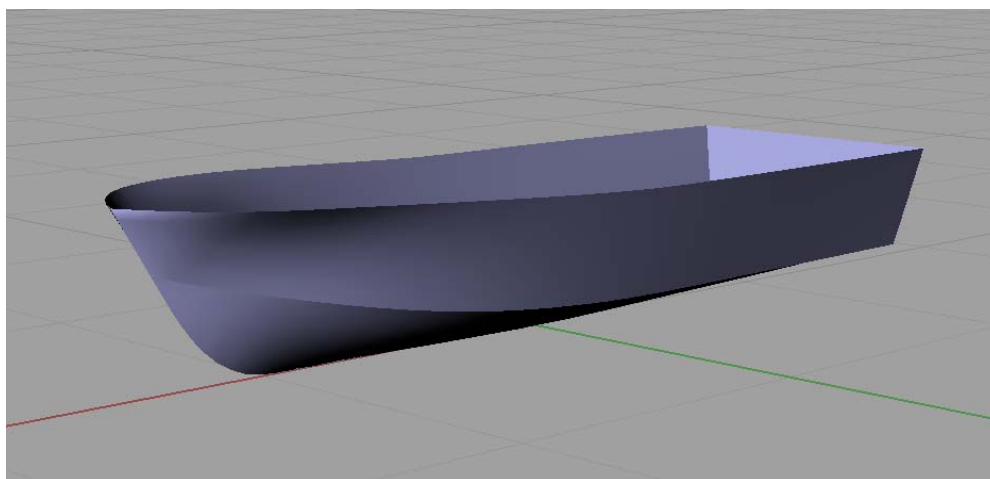
Za stimuliranje turbulencije korištena je žica promjera 1 mm postavljena duž konture pramca.

Na temelju nacrtu rebara modela, slika 3.1, generiran je 3D model pomoću programa Rhino 4.0 [7]. Nakon što su u prostoru modelirana sva rebra modela, generirane su 3D plohe koje ih povezuju, slika 3.2.

Trup ima V oblik rebara dna, zgib koji se proteže čitavom duljinom trupa te uronjeno ravno krmeno zrcalo na kojem se strujanje odvaja od trupa. Potrebno je poznavati tok strujanja na takvoj krmu, jer zbog diskontinuiteta strujanja može doći do vrtloženja i odvajanja strujanja. Pri dovoljno visokim brzinama kod poludeplasmanskih i gliserskih formi na takvom krmenom zrcalu dolazi do tzv. čistog odvajanja strujanja i zrcalo je gotovo čitavo iznad površine vode. Daljnji proračun temelji se na toj pretpostavci.



Slika 3.1 Nacrt rebara modela



Slika 3.2 3D model trupa

### 3.2. Određivanje vodne linije

Pomoću fotografija ispitivanja modela u bazenu za dvije različite brzine, ručno je određena vodna linija za svaku pojedinu brzinu te je projicirana na 3D model na način da je fotografija učitana u program kao bi se model postavio u točnu perspektivu fotografije s ispitivanja. Oplakana površina izračunata je pomoću naredbe „*Surface area*“ programom Rhino 4.0 uz točnost od +2% u usporedbi s oplakanom površinom određenom prilikom bazenskog ispitivanja. Na slikama 3.3.a), b) prikazane su fotografije snimljene za vrijeme ispitivanja modela pri brzinama  $v_M=5,002$  m/s i  $v_M=6,594$  m/s.



Slika 3.3.a) Fotografija ispitivanja modela pri brzini  $v_M=5,002$  m/s



Slika 3.3.b) Fotografija ispitivanja modela pri brzini  $v_M=6,594$  m/s

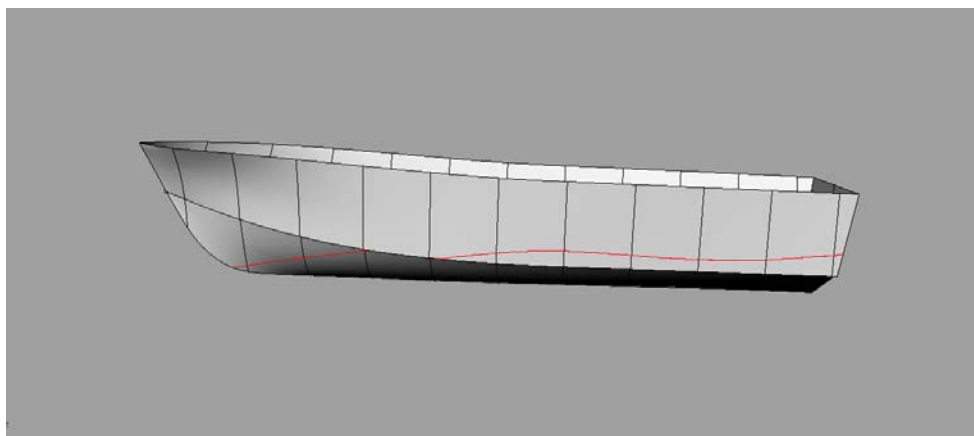
Za te dvije brzine razmotren je utjecaj pogreške očitavanja oplakane površine na način da je sustavno varirano očitavanje pomicanjem cijele vodne linije u vertikalnom smjeru te pomicanjem samo pramčanog dijela vodne linije kako bi se utvrdio značaj netočnog očitavanja s nejasne slike uslijed pojave vodene prašine.

### 3.3. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela

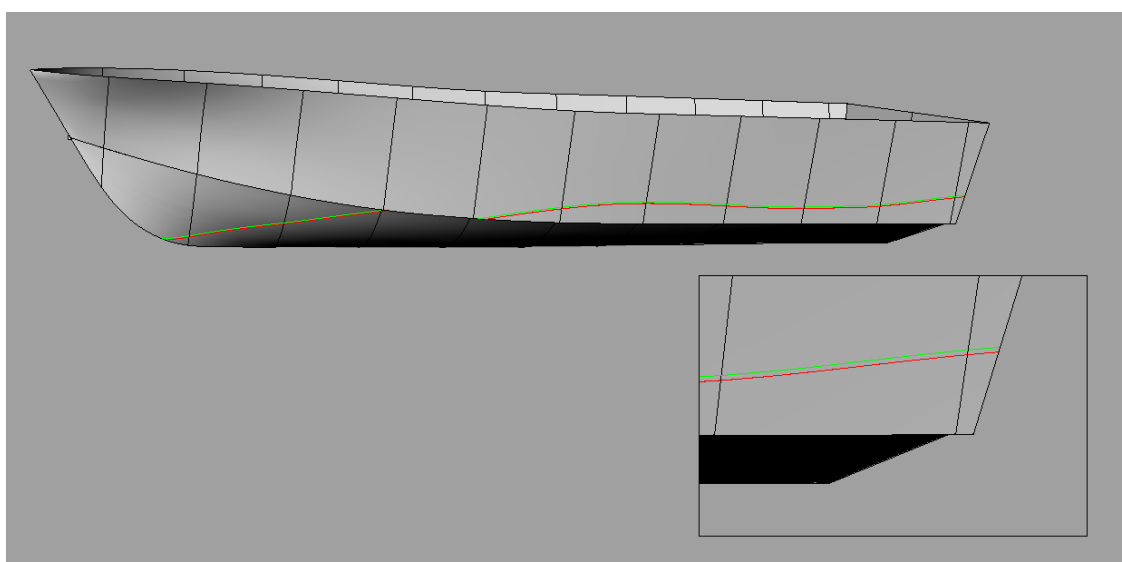
#### 3.3.1. Sustavno variranje očitavanja cijele vodne linije

Najprije je razmotren utjecaj za manju brzinu modela koja iznosi  $v_M=5,002$  m/s, odnosno brzinu broda  $v_S=9,352$  m/s (18,18čv). Sila otpora izmjerena u bazenu pri toj brzini iznosi  $R_{T_M}=258,36$  N.

Nakon što je određena i projicirana na 3D model, slika 3.4, vodna linija sustavno je pomicala u vertikalnom smjeru za  $\pm 20$  mm s korakom od 5 mm, slika 3.5.



**Slika 3.4** Vodna linija modela pri brzini  $v_M=5,002$  m/s



**Slika 3.5** Pomaknuta vodna linija modela pri brzini  $v_M=5,002$  m/s za 5 mm

Vodna linija aproksimirana pomoću fotografija pretpostavljena je kao točna vodna linija koja se generira pri određenoj brzini. Samim time je i izračunata oplakana površina (uz odstupanje do +2%) pretpostavljena kao „mjerodavna“ oplakana površina koja daje silu ukupnog otpora modela na temelju rezultata mjerenja u bazenu:

$$R_{T_M} = 0,5 C_{T_M} \rho_M v_M^2 S_M \quad (3.1)$$

gdje je:

$R_{T_M}$  - sila ukupnog otpora modela, N,

$C_{T_M}$  - koeficijent ukupnog otpora modela,

$\rho_M$  - gustoća vode u bazenu,  $\text{kg/m}^3$ ,

$v_M$  - brzina modela,  $\text{m/s}$ ,

$S_M$  - oplakana površina modela,  $\text{m}^2$ .

Uz konstantnu brzinu modela i silu otpora izmjerenu pri ispitivanju određen je za „mjerodavnu“ oplakanu površinu koeficijent ukupnog otpora modela. Zatim je isti koeficijent određen za svako očitavanje oplakane površine te su izračunata apsolutna i postotna odstupanja od koeficijenta ukupnog otpora modela za „mjerodavnu“ oplakanu površinu prema izrazima:

$$p_a = x_{mj} - x_p \quad (3.2)$$

gdje je:

$p_a$  - apsolutna pogreška,

$x_{mj}$  - očitana vrijednost mjerene veličine,

$x_p$  - „mjerodavna“ vrijednost,

$$p_{\%} = ((x_{mj} - x_p)100\%)/x_p \quad (3.3)$$

gdje je  $p_{\%}$  postotna pogreška, %.

Koeficijent ukupnog otpora „mjerodavne“ oplakane površine definiran je izrazom:

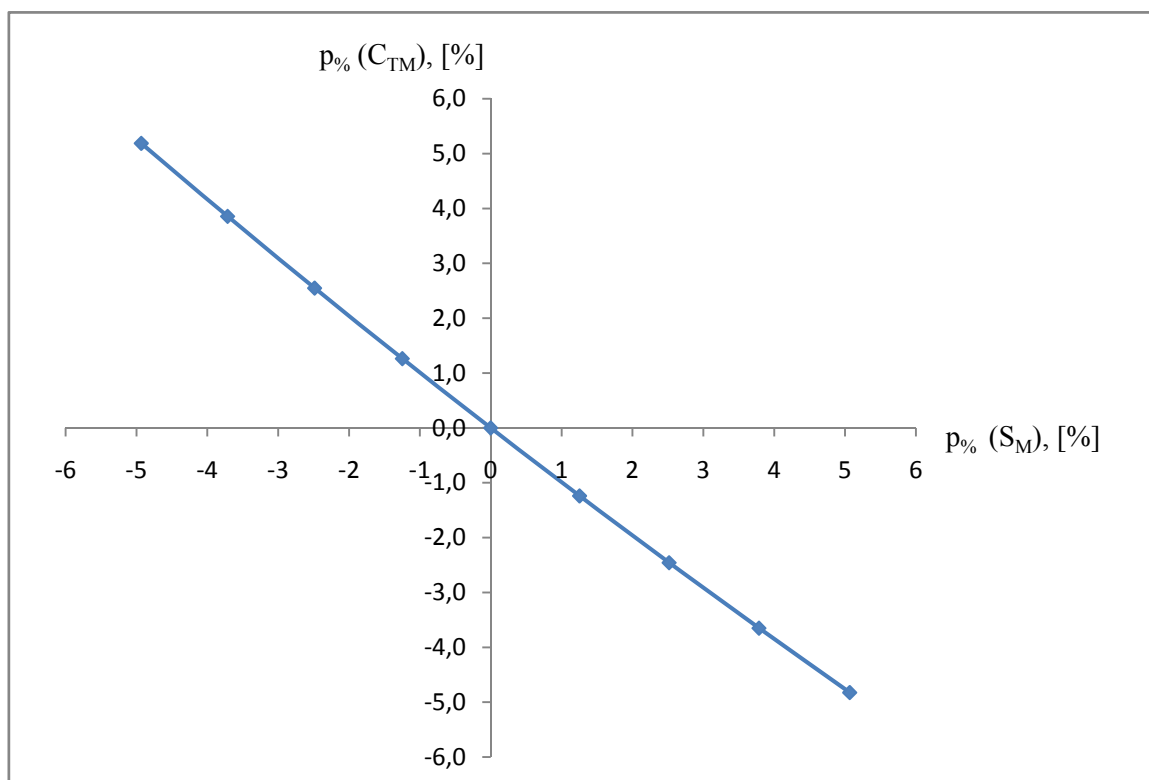
$$C_{T_{M0}} = R_{T_M}/(0,5\rho_M v_M^2 S_{M0}) \quad (3.4)$$

gdje je  $S_{M0}$  „mjerodavna“ oplakana površina,  $\text{m}^2$ .

Rezultati proračuna dani su u tablici 3.1, a prikazani su grafički na slici 3.6.

**Tablica 3.1** Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela ( $v_M=5,002$  m/s)

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina modela $S_M$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_M)$ , [%]	Koeficijent ukupnog otpora modela $C_{TM}^*$ 1000	Apsolutna pogreška $p_a(C_{TM})^*$ 1000	Postotna pogreška $p\%(C_{TM})$ , [%]
20	1,955	5,0673	10,580	-0,5361	-4,8229
15	1,931	3,7869	10,711	-0,4056	-3,6487
10	1,907	2,5187	10,843	-0,2731	-2,4568
5	1,884	1,2544	10,979	-0,1377	-1,2388
0	1,861	0,0000	11,116	0,0000	0,0000
-5	1,837	-1,2470	11,257	0,1404	1,2627
-10	1,814	-2,4849	11,400	0,2833	2,5482
-15	1,791	-3,7132	11,545	0,4287	3,8564
-20	1,769	-4,9314	11,693	0,5766	5,1872



**Slika 3.6** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela pri brzini  $v_M=5,002$  m/s

Na slici 3.6 vidljivo je da je promjena koeficijenta ukupnog otpora modela uslijed netočnosti očitavanja oplakane površine gotovo linearna. Povećanjem oplakane površine vrijednost

koeficijenta ukupnog otpora modela opada budući je odnos između te dvije veličine obrnuto proporcionalan. Primjerice pogreška u očitavanju vodne linije od +1 cm, rezultirat će odstupanjem koeficijenta ukupnog otpora za oko -2.5 %.

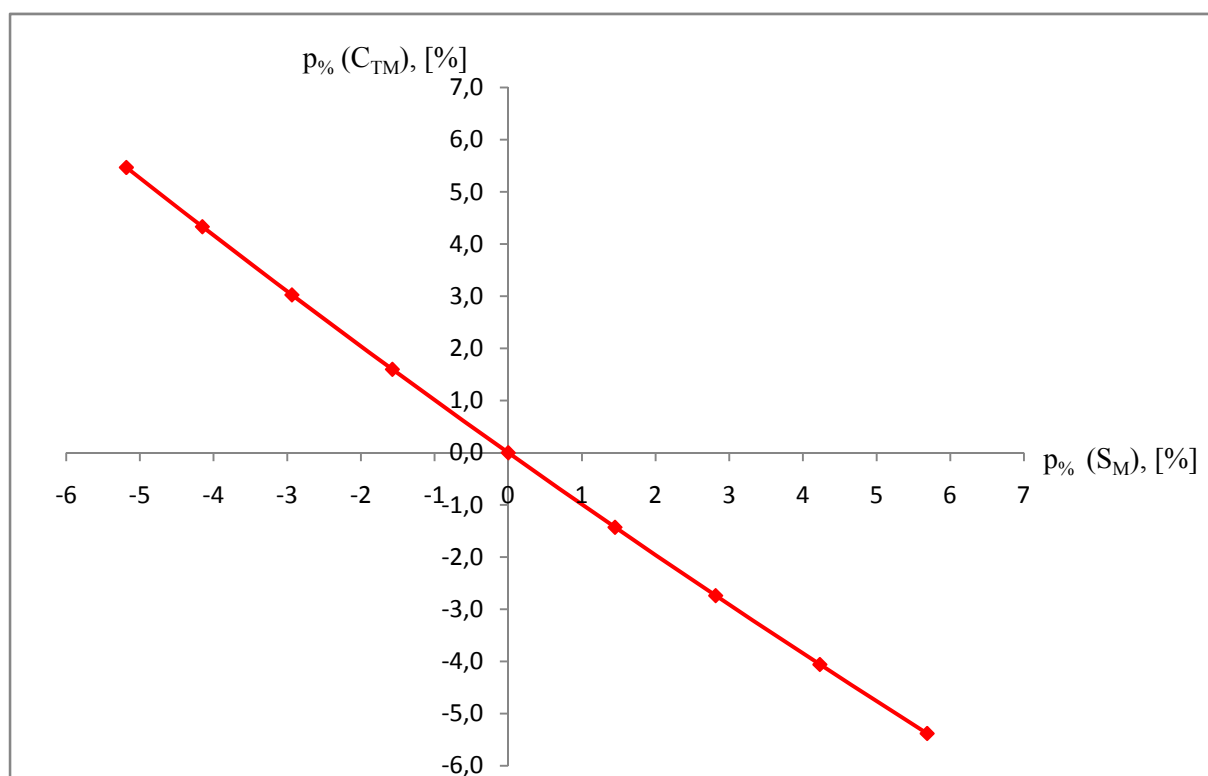
Isti proračun proveden je i za nešto veću brzinu modela  $v_M=6,594$  m/s, odnosno brzinu broda  $v_S=12,335$  m/s (23,98 čv). Sila otpora izmjerena u bazenu pri toj brzini iznosi  $R_{T_M}=278,76$  N.

Rezultati proračuna dani su u tablici 3.2, a grafički su prikazani na slici 3.7.

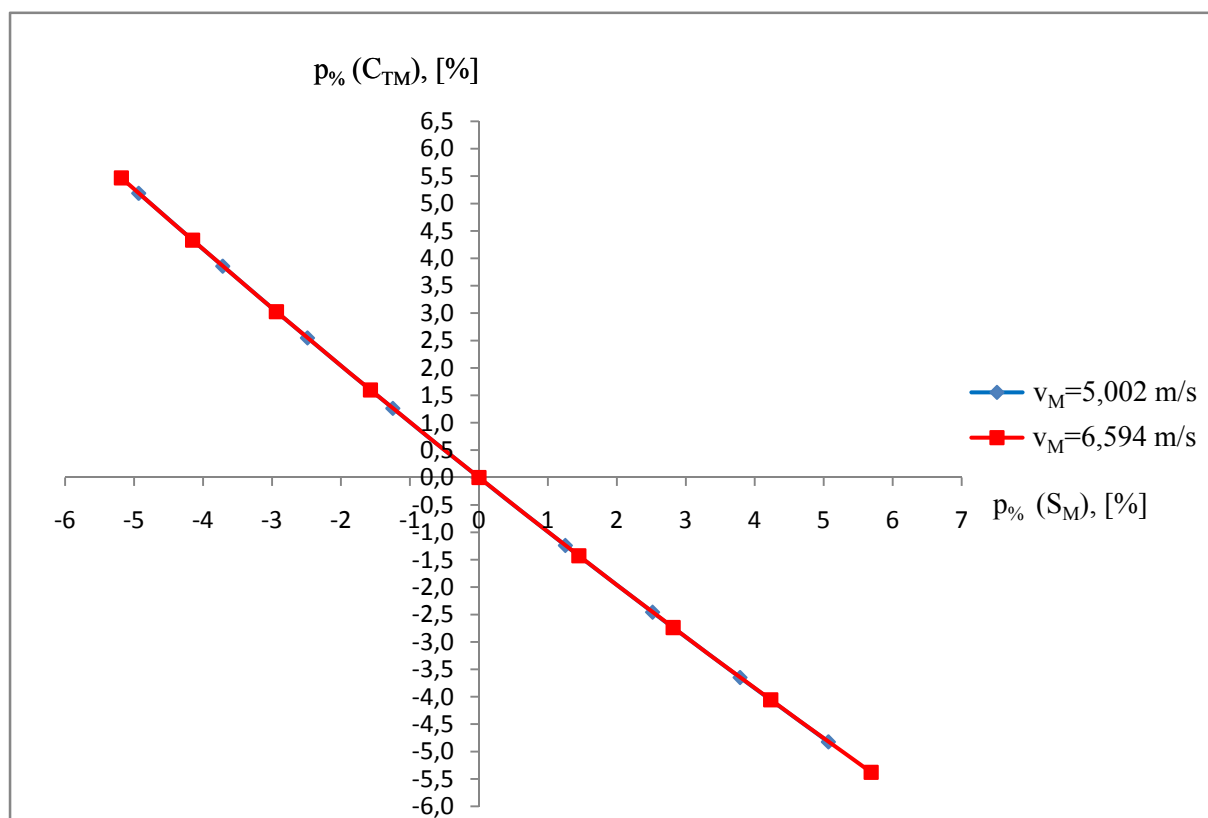
**Tablica 3.2 Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela ( $v_M=6,594$  m/s)**

<b>Greška očitavanja vodne linije, [mm]</b>	<b>Oplakana površina modela <math>S_M</math>, [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Postotna pogreška oplakane površine <math>p\%(S_M)</math>, [%]</b>	<b>Koeficijent ukupnog otpora modela <math>C_{T_M} * 1000</math></b>	<b>Apsolutna pogreška <math>p_a(C_{T_M}) * 1000</math></b>	<b>Postotna pogreška <math>p\%(C_{T_M})</math>, [%]</b>
<b>20</b>	1,814	5,6860	7,080	-0,4025	-5,3800
<b>15</b>	1,789	4,2298	7,179	-0,3036	-4,0581
<b>10</b>	1,765	2,8153	7,277	-0,2049	-2,7382
<b>5</b>	1,741	1,4488	7,375	-0,1069	-1,4281
<b>0</b>	1,716	0,0000	7,482	0,0000	0,0000
<b>-5</b>	1,689	-1,5733	7,602	0,1196	1,5984
<b>-10</b>	1,666	-2,9369	7,709	0,2264	3,0258
<b>-15</b>	1,645	-4,1524	7,806	0,3241	4,3322
<b>-20</b>	1,627	-5,1842	7,891	0,4091	5,4676

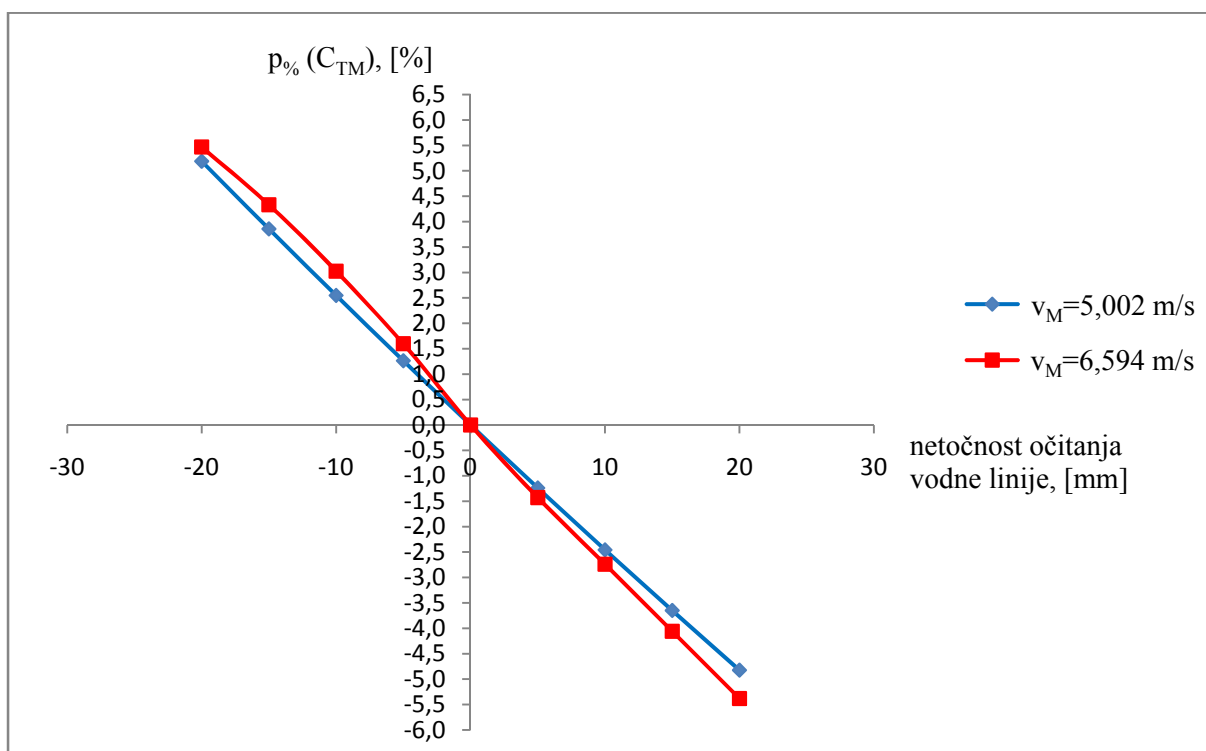




Slika 3.7 Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na koeficijent ukupnog otpora modela pri brzini  $v_M = 6,594$  m/s



Slika 3.8 Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine za obje brzine



**Slika 3.9** Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja vodne linije za obje brzine

Na slikama 3.8 i 3.9 dana je usporedba rezultata proračuna za obje brzine u ovisnosti o postotnoj pogrešci oplakane površine i netočnosti očitavanja vodne linije. Vidljivo je da pogreška u očitavanju za veću brzinu više utječe na iznos koeficijenta ukupnog otpora modela. Kod poludeplasmanskih formi većinu oplakane površine trupa čini dno trupa. U ova dva slučaja određeni dio oplakane površine čini i površina boka, no pri većoj brzini to je gotovo zanemarivo u odnosu na dno. Zato će i pogreška u očitavanju oplakane površine na većoj brzini više utjecati na rezultate. Pri većim brzinama veća je i mogućnost pojave vodene prašine pa je samim time i određivanje vodne linije teže.

### 3.3.2. Sustavno variranje očitavanja dijela vodne linije na pramcu

Pri većim brzinama i kod Froudeovog broja koji iznosi približno 0,5 znatno se povećava mogućnost pojave vodene prašine [8]. Energija je između ostalog tada rasipana i u vodenoj prašini, te je potrebno uzeti u obzir i otpor vodene prašine (eng. *spray resistance*) kao dio ukupnog otpora. Kod deplasmanskih formi taj dio otpora se zanemaruje.

Otpor vodene prašine dijeli se na dvije komponente:

$$R_S = R_{SP}(Fn) + R_{SF}(Rn, Wb) \quad (3.5)$$

gdje je:

$R_S$  - otpor vodene prašine, N,

$R_{SP}$  - otpor tlaka vodene prašine (viskozni otpor), N,

$R_{SF}$  - otpor trenja vodene prašine, N.

Otpor tlaka vodene prašine funkcija je Froudeovog broja, dok je otpor trenja vodene prašine funkcija Reynoldsovog i Weberovog broja definiranog kao:

$$W_b = (\rho v_{SR}^2 d_{SR}) / T_S \quad (3.6)$$

gdje je:

$v_{SR}$  - brzina vodene prašine, m/s,

$d_{SR}$  - debljina vodene prašine, m,

$T_S$  - napetost slobodne površine, N/m.

Vodena prašina nastaje uslijed velikog tlaka koji djeluje na pramčani dio trupa broda u blizini slobodne površine. Dio vodene prašine iznad vode mješavina je kapljica vode i čestica zraka.

Otpor trenja vodene prašine uzrokovan je utjecajem vodene prašine na nadvodni dio trupa i taj otpor teško je odrediti budući da je nepoznat koeficijent otpora trenja vodene prašine. Može se izračunati jedino ispitivanjem modela u mjerilu 1:1, tj. broda u naravi.

Ta komponenta otpora vodene prašine može se smanjiti ugradnjom tzv. deflektora vodene prašine (eng. *spray rail*) koji se proteže čitavom duljinom trupa i nastoji odvojiti vodenu prašinu od trupa te tako smanjiti oplakanu površinu, slika 3.10. No takvim rješenjem pojavljuje se dodatna komponenta otpora odnosno otpor samih deflektora:

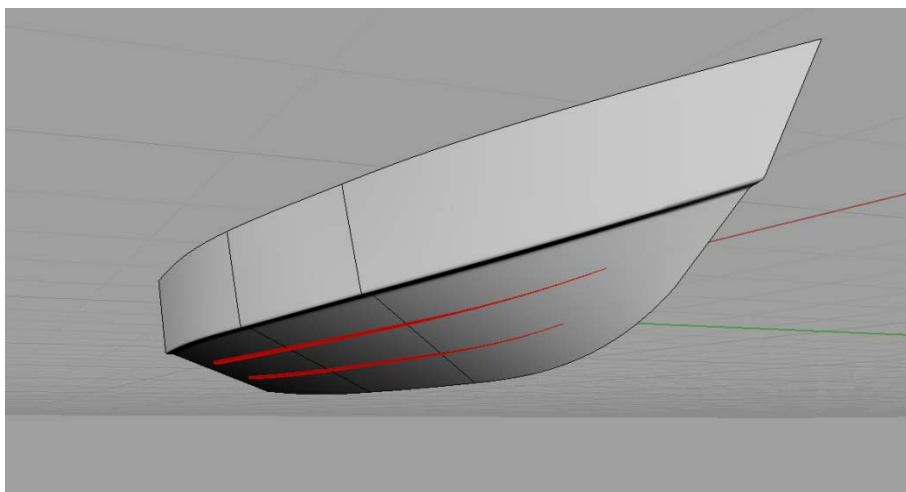
$$R_{SR} = R_{SRP} + R_{SRF} \quad (3.7)$$

gdje je:

$R_{SR}$  - otpor deflektora vodene prašine, N,

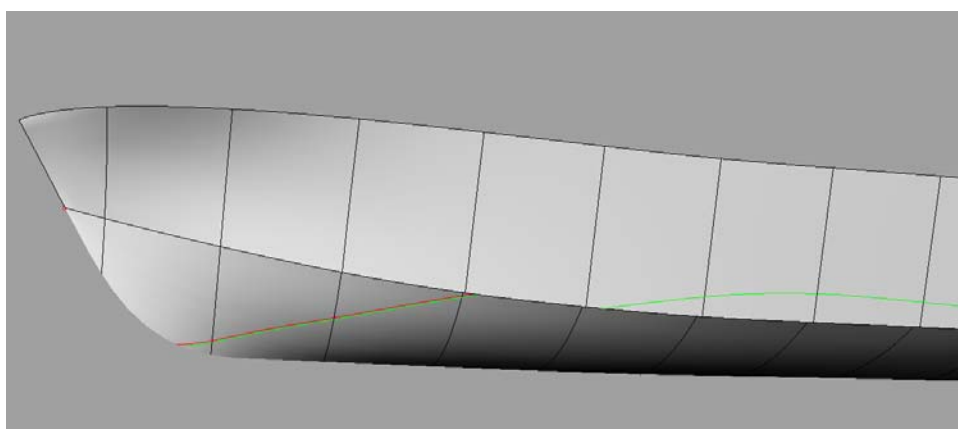
$R_{SRP}$  - otpor deflektora uzrokovan generiranjem hidrodinamičkog uzgona koji se javlja zbog zakretanja vodene prašine od deflektora, N,

$R_{SRF}$  - otpor trenja deflektora, N.



**Slika 3.10 Deflektori vodene prašine**

Kako bi se odredila točnost očitavanja dijela vodne linije na pramcu čiji oblik može biti nejasan uslijed pojave vodene prašine pri većim brzinama, vertikalno je pomican samo pramčani dio vodne linije do zgiba, slika 3.11.

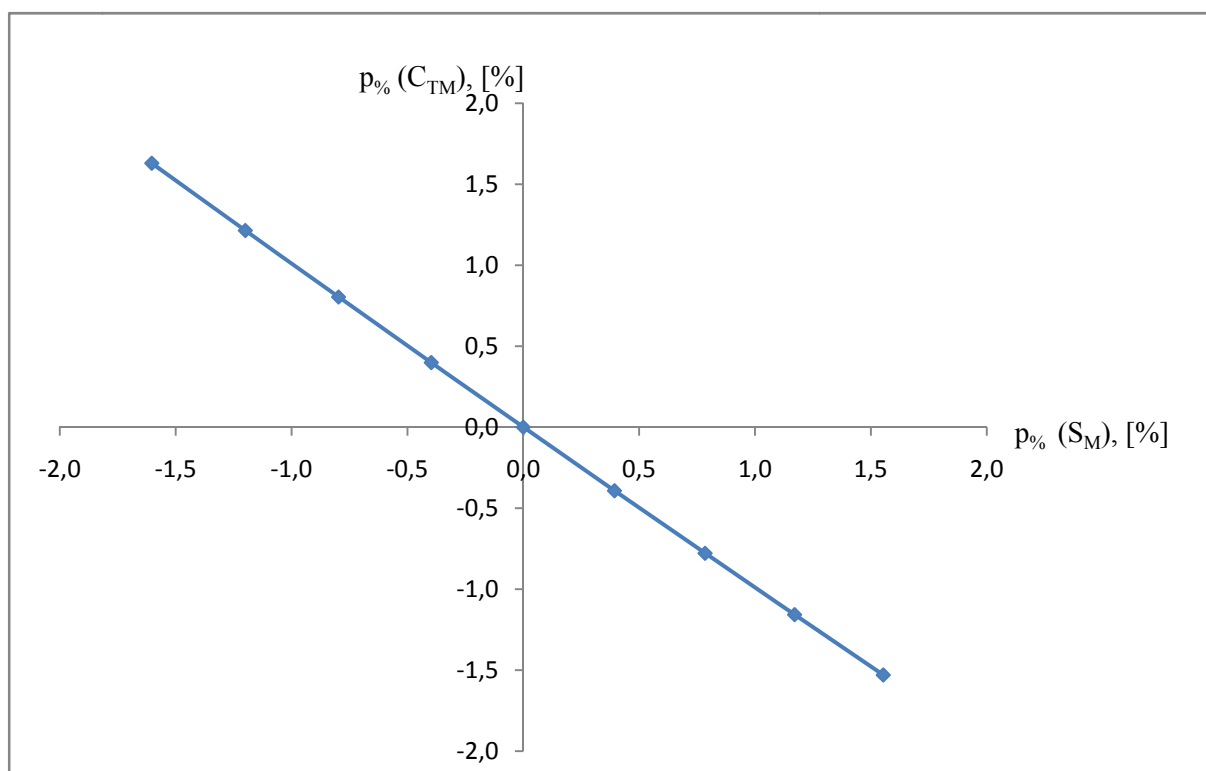


**Slika 3.11 Pomaknuti pramčani dio vodne linije pri brzini  $v_M=5,002$  m/s**

Rezultati proračuna za brzinu modela  $v_M=5,002$  m/s dani su u tablici 3.3 i prikazani su na slici 3.12.

**Tablica 3.3** Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora modela ( $v_M=5,002$  m/s)

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina modela $S_M$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_M)$ , [%]	Koeficijent ukupnog otpora modela $C_{TM} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{TM}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{TM})$ , [%]
20	1,889	1,5534	10,946	-0,1700	-1,5296
15	1,882	1,1707	10,988	-0,1286	-1,1572
10	1,875	0,7844	11,030	-0,0865	-0,7783
5	1,868	0,3937	11,073	-0,0436	-0,3921
0	1,861	0,0000	11,116	0,0000	0,0000
-5	1,853	-0,3970	11,161	0,0443	0,3986
-10	1,846	-0,7971	11,206	0,0893	0,8035
-15	1,838	-1,1994	11,251	0,1349	1,2139
-20	1,831	-1,6030	11,298	0,1811	1,6292



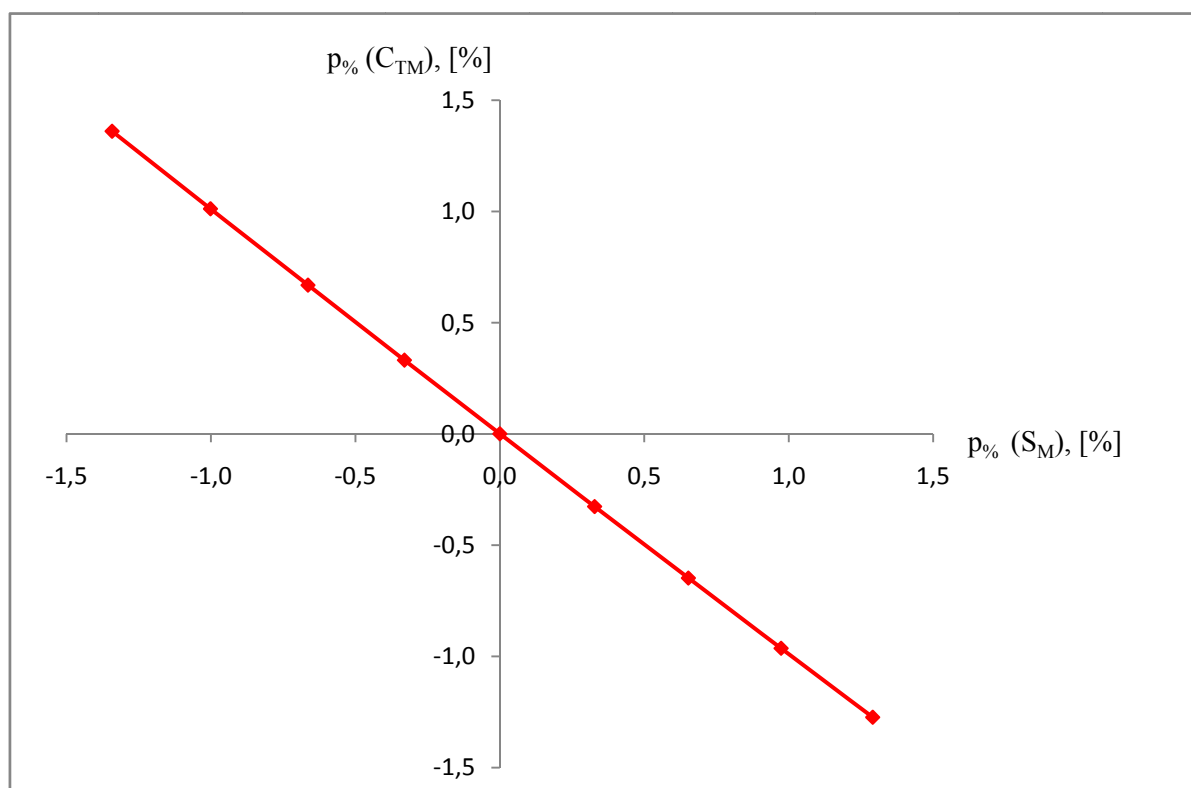
**Slika 3.12** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora modela pri brzini  $v_M=5,002$  m/s

Isti proračun proveden je i za nešto veću brzinu modela  $v_M=6,594$  m/s, odnosno brzinu broda  $v_S=12,335$  m/s (23,98čv).

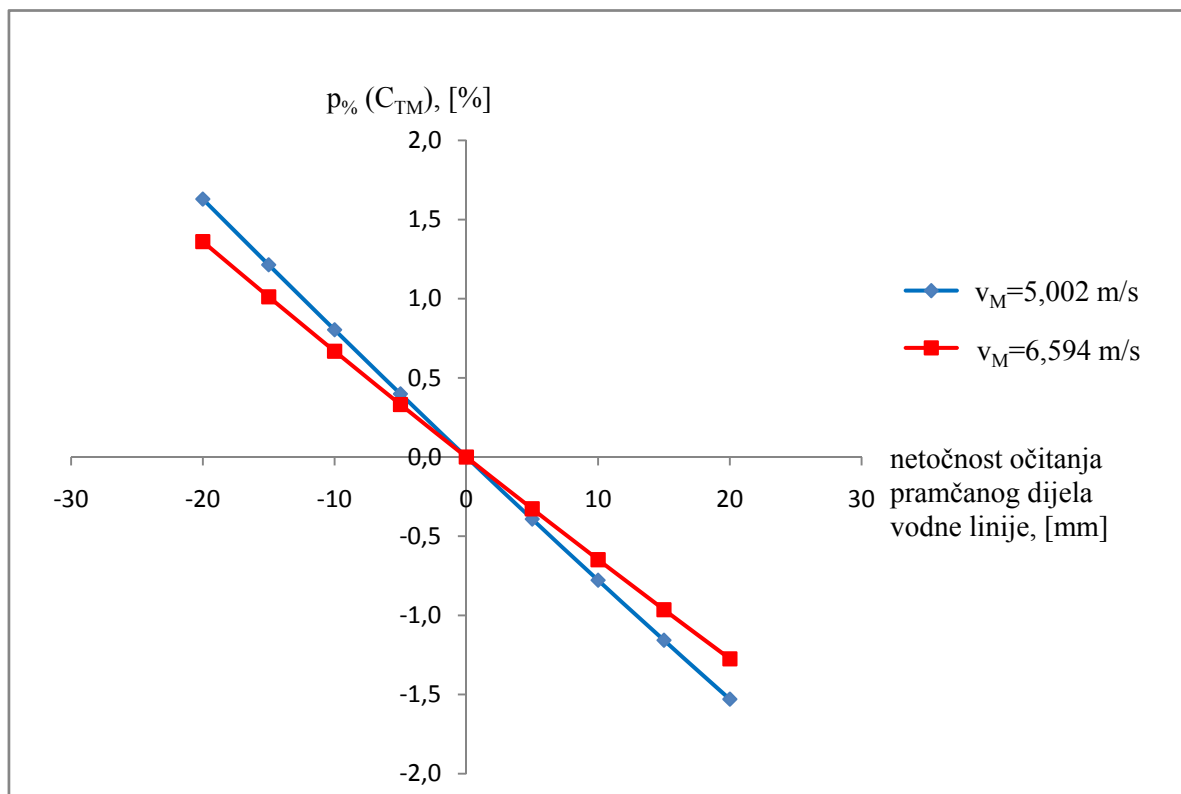
Rezultati proračuna dani su u tablici 3.4 i prikazani su na slici 3.13.

**Tablica 3.4** Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora modela ( $v_M=6,594$  m/s)

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina modela $S_M$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_M)$ , [%]	Koeficijent ukupnog otpora modela $C_{TM} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{TM}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{TM})$ , [%]
20	1,738	1,2906	7,387	-0,0953	-1,2742
15	1,733	0,9735	7,410	-0,0721	-0,9641
10	1,727	0,6525	7,434	-0,0485	-0,6483
5	1,722	0,3280	7,458	-0,0245	-0,3269
0	1,716	0,0000	7,482	0,0000	0,0000
-5	1,711	-0,3303	7,507	0,0248	0,3314
-10	1,705	-0,6640	7,532	0,0500	0,6685
-15	1,699	-1,0015	7,558	0,0757	1,0116
-20	1,693	-1,3421	7,584	0,1018	1,3603



**Slika 3.13** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora modela pri brzini  $v_M=6,594$  m/s



**Slika 3.14** Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost koeficijenta ukupnog otpora za obje brzine

Na slici 3.14 prikazana je ovisnost netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije i netočnosti koeficijenta ukupnog otpora modela za obje brzine i vidljivo je da će pogreška imati više utjecaja na konačne rezultate otpora pri manjoj brzini. Za jednaku pogrešku očitavanja od primjerice +1 cm razlika porasta otpora između te dvije brzine iznosi oko 0,13 %.

Pri manjoj brzini gaz modela na pramcu veći je nego što je to slučaj pri većoj brzini. Dok se pramčani dio vodne linije koja se generira pri većoj brzini nalazi većim dijelom na području relativno plosnatog dna modela, pri manjoj brzini se ona nalazi na zakrivljenom dijelu pramca. Obzirom da su za određivanje oblika vodnih linija korištene samo fotografije boka broda, vertikalnim pomicanjem vodne linije pri manjoj brzini uslijed većeg zakrivljenja forme trupa, odnosno samog pramca, napravljena je veća pogreška. Kombinacijom analiziranja fotografija boka broda i pramca modela mogao bi se točnije odrediti oblik vodne linije i pogreška bi stoga bila manja.

### 3.4. Preračunavanje rezultata s modela na brod

Kako bi se odredio utjecaj koji će netočno očitavanje oplakane površine modela imati na rezultate za brod u naravi, rezultati su na temelju Froudeovog zakona sličnosti, preračunati na brod.

Najprije je izračunat koeficijent otpora trenja  $C_F$  modela prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-57 kako bi se odredio  $C_R$ , odnosno koeficijent preostalog otpora koji je jednak za model i za brod:

$$C_{FM} = 0,075/((\log Rn_M - 2)^2) \quad (3.8)$$

gdje je:

$C_{FM}$  - koeficijent otpora trenja modela,

$Rn_M$  - Reynoldsov broj za model.

Reynoldsov broj u jednadžbi (3.8) određen je na temelju podataka o modelu i uvjetima u bazenu prilikom ispitivanja modela.

Koeficijent preostalog otpora modela  $C_{RM}$  može se prikazati kao:

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \quad (3.9)$$

gdje je  $C_{TM}$  koeficijent ukupnog otpora modela definiran za svako očitavanje oplakane površine.

Prema Froudeovom zakonu sličnosti vrijedi:

$$C_{RM} = C_{RS} \quad (3.10)$$

gdje je  $C_{RS}$  koeficijent preostalog otpora broda.

Na temelju mjerila geometrijske sličnosti  $\lambda$  modela i broda određena je brzina broda (uz jednakost Froudeovih brojeva  $Fn = idem$ ) i duljina broda kako bi se odredio Reynoldsov broj za brod:

$$v_S = v_M \sqrt{\lambda} \quad (3.11)$$

$$L_S = L_M \lambda \quad (3.12)$$

Pretpostavljeni su standardni uvjeti za morsku vodu temperature  $15^\circ\text{C}$  ( $\nu = 1,1883 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\rho = 1025,87 \text{ kg/m}^3$ ).

Reynoldsov broj za brod dan je izrazom:

$$Rn_S = (v_S L_S) / \nu_S \quad (3.13)$$



gdje je:

$v_S$  - brzina broda, m/s,

$L_S$  - duljina broda, m,

$\nu_S$  - koeficijent kinematičke viskoznosti morske vode, m<sup>2</sup>/s.

Koeficijent otpora trenja broda  $C_{FS}$  računa se prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-57:

$$C_{FS} = 0,075/((\log Rn_S - 2)^2) \quad (3.13)$$

gdje je  $C_{FS}$  koeficijent otpora trenja broda.

Na temelju izračunatog, konačno je određen koeficijent ukupnog otpora broda  $C_{TS}$ , uz konstantan korelacijski dodatak  $\Delta C_T$  uslijed hrapavosti površine broda:

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS} + \Delta C_T \quad (3.15)$$

Kako bi se odredila sila ukupnog otpora broda bilo je potrebno izračunati i dinamičke vrijednosti oplakane površine, odnosno preračunati ih na temelju geometrijske sličnosti vrijednosti oplakanih površina modela dobivenih sustavnim pomicanjem vodne linije na modelu:

$$S_S = \lambda^2 S_M \quad (3.16)$$

gdje je:

$S_S$  - oplakana površina broda, m<sup>2</sup>,

$\lambda$  - mjerilo geometrijske sličnosti modela i broda,

$S_M$  - oplakana površina modela, m<sup>2</sup>.

Ukupni otpor broda računa se prema:

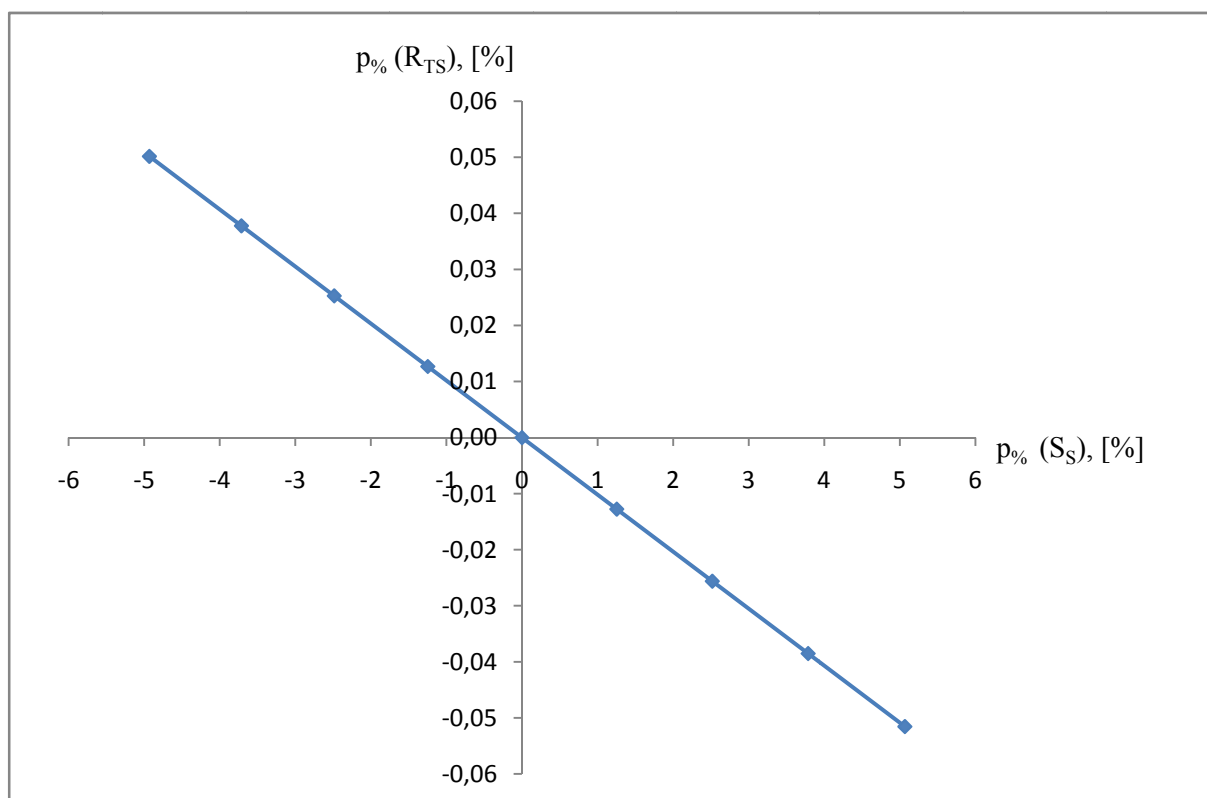
$$R_{TS} = 0,5 C_{TS} \rho_S v_S^2 S_S \quad (3.17)$$

gdje je  $\rho_S$  gustoća morske vode, kg/m<sup>3</sup>.

Rezultati proračuna za manju brzinu broda  $v_S=9,352$  m/s (18.18 čv) dani su u tablicama 3.5 i 3.6 te su prikazani na slikama 3.15 i 3.16. Na slici 3.15 prikazan je utjecaj variranja cijele vodne linije te na slici 3.16 samo pramčanog dijela vodne linije modela (utjecaj vodene prašine).

Tablica 3.5. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_s=9,352$  m/s)

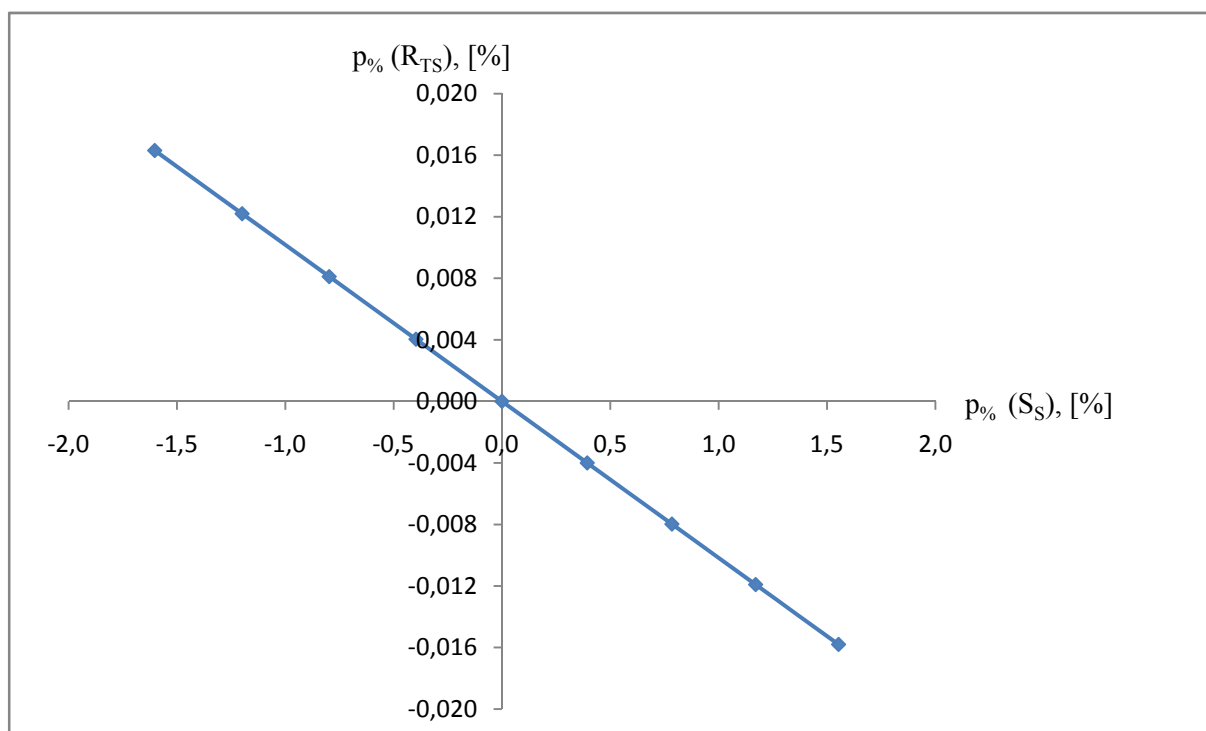
Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina broda $S_s$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_s)$ , [%]	Koeficijent preostalog otpora broda $C_{R_s} * 1000$	Koeficijent ukupnog otpora broda $C_{T_s} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{T_s}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{T_s})$ , [%]	Ukupni otpor broda $R_{T_s}$ , [N]	Apsolutna pogreška $p_a(R_{T_s})$ , [N]	Postotna pogreška $p\%(R_{T_s})$ , [%]
20	23,947	5,0673	7,674	10,468	-0,5361	-4,8720	11245,41	-5,7999	-0,0515
15	23,655	3,7869	7,804	10,599	-0,4056	-3,6858	11246,87	-4,3343	-0,0385
10	23,366	2,5187	7,937	10,731	-0,2731	-2,4818	11248,33	-2,8829	-0,0256
5	23,078	1,2544	8,072	10,867	-0,1377	-1,2514	11249,77	-1,4357	-0,0128
0	22,792	0,0000	8,210	11,005	0,0000	0,0000	11251,21	0,0000	0,0000
-5	22,507	-1,2470	8,350	11,145	0,1404	1,2756	11252,64	1,4273	0,0127
-10	22,225	-2,4849	8,493	11,288	0,2833	2,5741	11254,05	2,8441	0,0253
-15	21,945	-3,7132	8,639	11,433	0,4287	3,8957	11255,46	4,2501	0,0378
-20	21,668	-4,9314	8,786	11,581	0,5766	5,2400	11256,85	5,6443	0,0502



**Slika 3.15** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine modela na silu ukupnog otpora broda pri brzini  $v_s=9,352$  m/s

Tablica 3.6. Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_S=9,352$  m/s)

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina broda $S_S$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_S)$ , [%]	Koeficijent preostalog otpora broda $C_{R_S} * 1000$	Koeficijent ukupnog otpora broda $C_{T_S} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{T_S}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{T_S})$ , [%]	Ukupni otpor broda $R_{T_S}$ , [N]	Apsolutna pogreška $p_a(R_{T_S})$ , [N]	Postotna pogreška $p\%(R_{T_S})$ , [%]
<b>20</b>	23,146	1,5534	8,040	10,834	-0,1700	-1,5452	11249,43	-1,7780	-0,0158
<b>15</b>	23,059	1,1707	8,081	10,876	-0,1286	-1,1690	11249,87	-1,3400	-0,0119
<b>10</b>	22,970	0,7844	8,123	10,918	-0,0865	-0,7862	11250,31	-0,8978	-0,0080
<b>5</b>	22,881	0,3937	8,166	10,961	-0,0436	-0,3961	11250,76	-0,4506	-0,0040
<b>0</b>	22,792	0,0000	8,210	11,005	0,0000	0,0000	11251,21	0,0000	0,0000
<b>-5</b>	22,701	-0,3970	8,254	11,049	0,0443	0,4026	11251,66	0,4544	0,0040
<b>-10</b>	22,610	-0,7971	8,299	11,094	0,0893	0,8117	11252,12	0,9124	0,0081
<b>-15</b>	22,518	-1,1994	8,345	11,139	0,1349	1,2263	11252,58	1,3727	0,0122
<b>-20</b>	22,426	-1,6030	8,391	11,186	0,1811	1,6457	11253,04	1,8348	0,0163

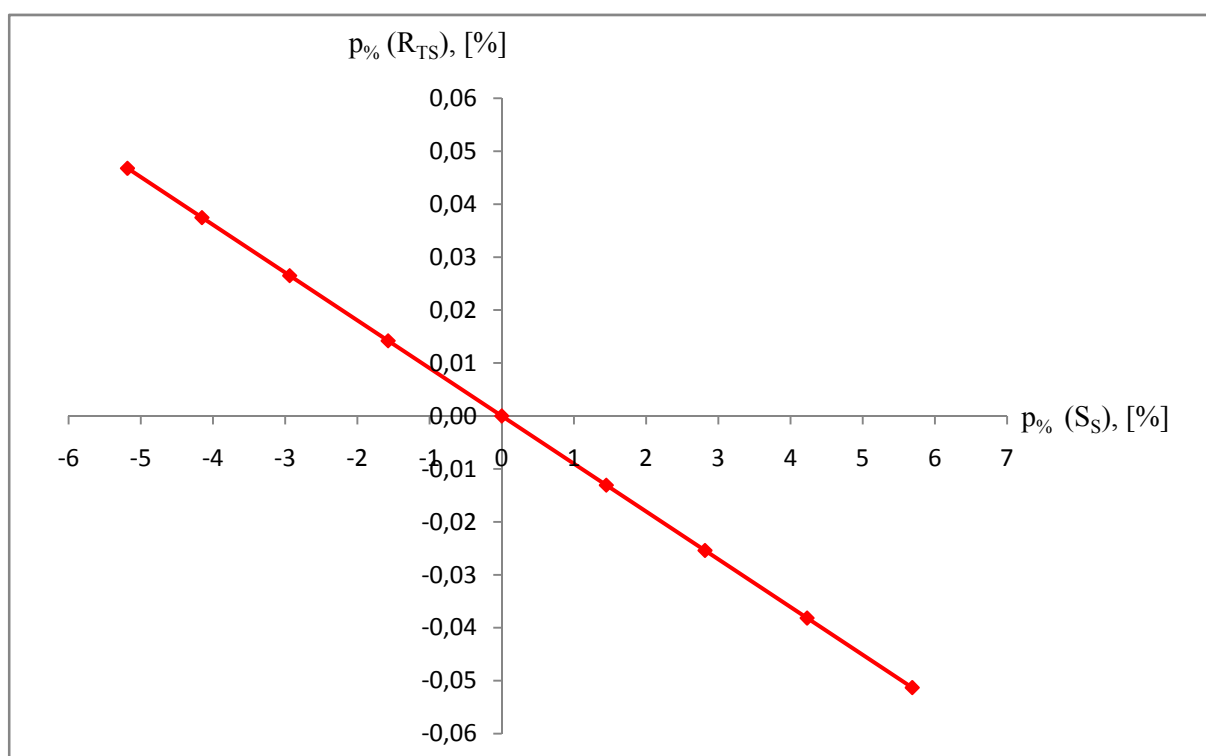


**Slika 3.16** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora broda pri brzini  $v_S=9,352$  m/s

Rezultati proračuna za veću brzinu broda  $v_S=12,335$  m/s (23,98 čv) dani su u tablicama 3.7 i 3.8 te su prikazani na slikama 3.17 i 3.18.

Tablica 3.7. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela na netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_s=12,335\text{m/s}$ )

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina broda $S_s$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_s)$ , [%]	Koeficijent preostalog otpora broda $C_{R_s} * 1000$	Koeficijent ukupnog otpora broda $C_{T_s} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{T_s}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{T_s})$ , [%]	Ukupni otpor broda $R_{T_s}$ , [N]	Apsolutna pogreška $p_a(R_{T_s})$ , [N]	Postotna pogreška $p\%(R_{T_s})$ , [%]
20	22,219	5,6860	4,306	7,013	-0,4025	-5,4286	12161,19	-6,2429	-0,0513
15	21,913	4,2298	4,405	7,112	-0,3036	-4,0948	12162,78	-4,6441	-0,0382
10	21,616	2,8153	4,503	7,210	-0,2049	-2,7629	12164,34	-3,0910	-0,0254
5	21,328	1,4488	4,601	7,308	-0,1069	-1,4410	12165,84	-1,5907	-0,0131
0	21,024	0,0000	4,708	7,415	0,0000	0,0000	12167,43	0,0000	0,0000
-5	20,693	-1,5733	4,828	7,535	0,1196	1,6128	12169,16	1,7274	0,0142
-10	20,406	-2,9369	4,935	7,642	0,2264	3,0531	12170,65	3,2246	0,0265
-15	20,151	-4,1524	5,032	7,739	0,3241	4,3713	12171,99	4,5591	0,0375
-20	19,934	-5,1842	5,117	7,824	0,4091	5,5169	12173,12	5,6919	0,0468

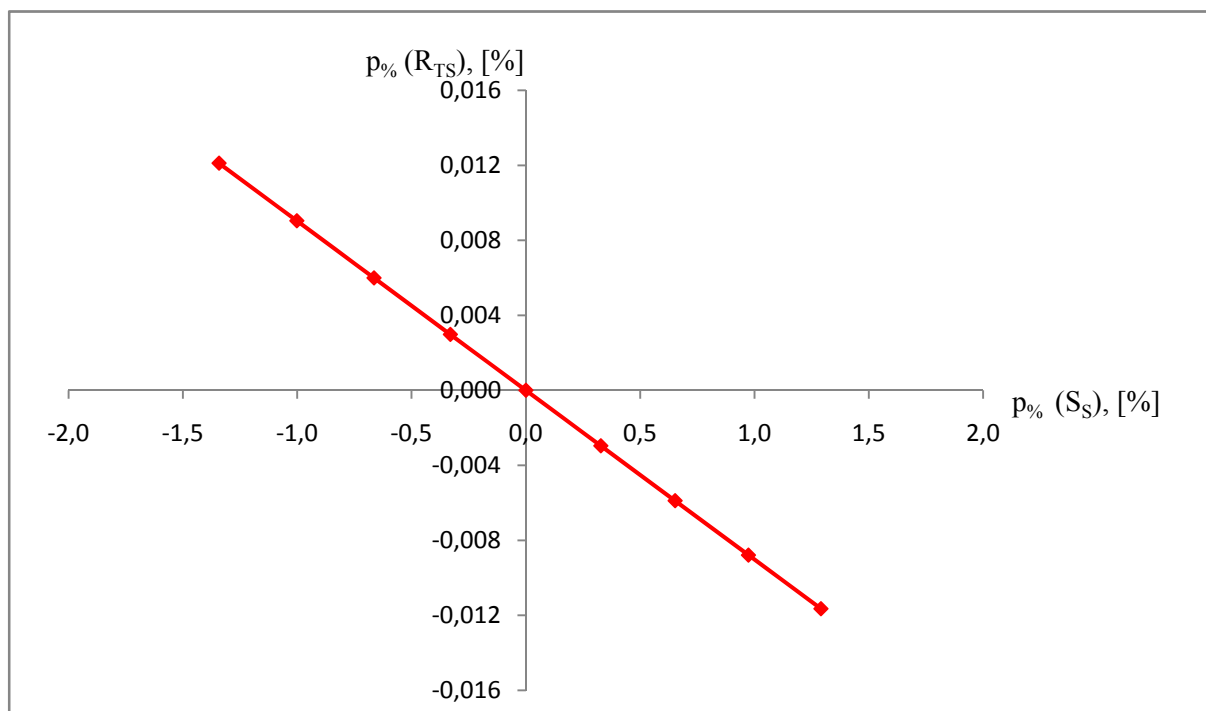


**Slika 3.17** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine modela na silu ukupnog otpora broda pri brzini  $v_s=12,335\text{m/s}$

Tablica 3.8. Utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linijena netočnost sile ukupnog otpora broda ( $v_s=12,335\text{m/s}$ )

Greška očitavanja vodne linije, [mm]	Oplakana površina broda $S_s$ , [m <sup>2</sup> ]	Postotna pogreška oplakane površine $p\%(S_s)$ , [%]	Koeficijent preostalog otpora broda $C_{R_s} * 1000$	Koeficijent ukupnog otpora broda $C_{T_s} * 1000$	Apsolutna pogreška $p_a(C_{T_s}) * 1000$	Postotna pogreška $p\%(C_{T_s})$ , [%]	Ukupni otpor broda $R_{T_s}$ , [N]	Apsolutna pogreška $p_a(R_{T_s})$ , [N]	Postotna pogreška $p\%(R_{T_s})$ , [%]
20	21,295	1,2906	4,613	7,320	-0,0953	-1,2857	12166,01	-1,4170	-0,0116
15	21,228	0,9735	4,636	7,343	-0,0721	-0,9728	12166,36	-1,0688	-0,0088
10	21,161	0,6525	4,660	7,367	-0,0485	-0,6542	12166,71	-0,7164	-0,0059
5	21,093	0,3280	4,684	7,391	-0,0245	-0,3299	12167,07	-0,3601	-0,0030
0	21,024	0,0000	4,708	7,415	0,0000	0,0000	12167,43	0,0000	0,0000
-5	20,954	-0,3303	4,733	7,440	0,0248	0,3343	12167,79	0,3626	0,0030
-10	20,884	-0,6640	4,758	7,465	0,0500	0,6745	12168,16	0,7291	0,0060
-15	20,813	-1,0015	4,784	7,491	0,0757	1,0208	12168,53	1,0996	0,0090
-20	20,742	-1,3421	4,810	7,517	0,1018	1,3726	12168,90	1,4735	0,0121





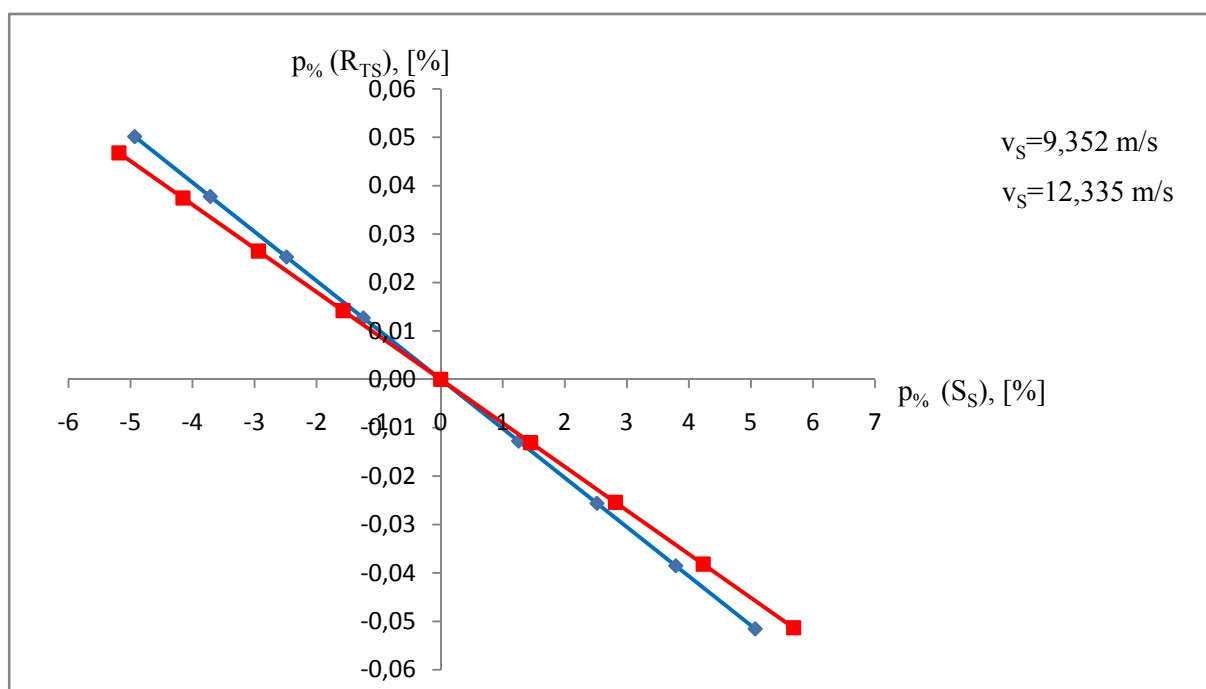
**Slika 3.18** Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije na netočnost sile ukupnog otpora broda pri brzini  $v_S=12,335\text{m/s}$

Vidljivo je kao i kod modelskih rezultata da će pri većoj brzini broda i netočnost koeficijenta ukupnog otpora broda biti veća. Isto tako i kod netočnog očitavanja pramčanog dijela vodne linije modela, vidljivo je da će se kao i kod modela veća greška pojavljivati pri manjoj brzini uslijed većeg zakrivljenja pramca na većim gazovima.

Ukupni otpor broda za obje brzine pada s porastom oplakane površine. Koeficijent ukupnog otpora broda i oplakana površina jedine su varijabilne vrijednosti u izrazu za ukupni otpor (3.17). No red veličine vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora broda manji je od reda veličine oplakane površine  $10^4$  puta. Isto tako (iako male) vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora brže padaju nego što to, za istu pogrešku očitavanja oplakane površine modela, vrijednosti oplakane površine broda rastu.

Iz toga slijedi da će tendencija rasta odnosno pada ukupnog otpora broda biti uvjetovana vrijednostima koeficijenta ukupnog otpora broda.

Na slici 3.19 prikazana je usporedba sile ukupnog otpora broda za dvije različite brzine.



**Slika 3.19** Usporedba utjecaja netočnosti očitavanja vodne linije na silu ukupnog otpora broda za obje brzine

Za razliku od koeficijenta ukupnog otpora broda i modela čija će netočnost biti izraženija pri većoj brzini, greška sile ukupnog otpora broda veća je pri manjoj brzini. Budući da se pri manjoj brzini mjere manje sile otpora modela moguće je da pogreška u mjerenju sile otpora bude veća. Nakon ekstrapolacije rezultata na brod vidljivo je da će iz tog razloga dinamička oplakana površina više utjecati na ukupni otpor pri manjim brzinama.

Iz proračuna se može zaključiti kako će netočno očitavanje vodne linije odnosno oplakane površine modela dati prihvatljiva odstupanja vrijednosti koeficijenata ukupnog otpora i oplakanih površina od „točnih“ vrijednosti. Proračunom određivanja sile ukupnog otpora broda također je pokazano kako su odstupanja vrijednosti koeficijenata ukupnog otpora gotovo zanemarive. Pogreške vrijednosti oplakanih površina i koeficijenata ukupnog otpora broda suprotnih su predznaka te se stoga u izrazu za silu ukupnog otpora poništavaju.

Također je vidljivo iz tablica 3.5 i 3.6 da preostali otpor čini gotovo 80 % ukupnog otpora broda te pogreške u očitavanju oplakane površine koje utječu na otpor trenja broda neće imati veliki utjecaj na netočnost rezultata.

#### 4. UTJECAJ DINAMIČKE OPLAKANE POVRŠINE NA OTPOR KATAMARANA

Prilikom određivanja otpora katamarana potrebno je voditi računa o mogućoj interferenciji između trupova koja je izraženija pri većim Froudeovim brojevima i ovisna o udaljenosti između trupova.

Na temelju ispitivanja provedenih na modelima lake deplasmanske forme oblog uzvoja može se zaključiti da pri većim Froudeovim brojevima dinamička oplakana površina može biti i do 15% veća od statičke oplakane površine (na mirnoj vodi) što je potpuno suprotno poludeplasmanskim i gliserskim formama [9]. No i u tom slučaju potrebno je uzeti u obzir način na koji se mijenja dinamička oplakana površina porastom brzine i kako utječe na komponente otpora broda.

Koeficijent ukupnog otpora katamarana može se izraziti kao:

$$C_{T \text{ cat}} = (1 + \beta k) C_{F \text{ mon}} + \tau C_{W \text{ mon}} \quad (4.1)$$

gdje je:

$\beta$  - faktor interferencije koji uzima u obzir promjenu polja tlaka oko trupova katamarana i porast brzine strujanja između trupova,

$k$  - faktor forme,

$C_{F \text{ mon}}$  - koeficijent otpora trenja jednog trupa,

$\tau$  - faktor interferencije valova,

$C_{W \text{ mon}}$  - koeficijent otpora valova jednog trupa.

Faktor forme  $k$  teško je odrediti budući da metoda Prohaske kojom se on određuje nije pogodna za forme s krmenim zrcalom gdje je pri malim brzinama zrcalo uronjeno, a pri većim (operativnim) brzinama potpuno suho. Zato je pretpostavljeno da faktor forme za dugačke vitke forme iznosi nula. Koeficijent ukupnog otpora katamarana sada se može prikazati na slijedeći način:

$$C_{T \text{ cat}} = C_{F \text{ mon}} + \tau C_{W \text{ mon}} \quad (4.2)$$

U ovom slučaju svi koeficijenti otpora temeljeni su na statičkoj oplakanoj površini, a utjecaj dinamičke oplakane površine uzet je u obzir preko koeficijenta  $w$  s kojim se množi koeficijent otpora trenja:

$$C_{T \text{ cat}} = w C_{F \text{ mon}} + C'_{R \text{ mon}} \quad (4.3)$$

gdje je:

$C'_{R \text{ mon}}$  - koeficijent preostalog otpora koji ima manju vrijednost od vrijednosti  $C_{R \text{ mon}}$  bez utjecaja dinamičke oplakane površine,

$w$  - omjer dinamičke (RWSA, eng. *running wetted surface area*) i statičke (SWSA, eng. *static wetted surface area*) oplakane površine:

$$w = \text{RWSA/SWSA} \quad (4.4)$$

Ispitani su modeli različitih omjera  $s/L$  odnosno omjera razmaka između trupova i duljine trupova pri različitim brzinama [9]. Omjer  $s/L$  imao je na dinamičku oplakanu površinu utjecaj jedino na manjoj udaljenosti između trupova ( $s/L=0,2$ ) pri većim Froudeovim brojevima gdje se značajno povećala dinamička oplakana površina na pramčanom unutarnjem dijelu trupova.

Pri većim brzinama može doći i do naplavljivanja paluba trupova na pramčanom dijelu što se može reducirati ugradnjim deflektora vodene prašine.

Rezultati ispitivanja [9] pokazuju da se utjecaj dinamičke oplakane površine na otpor katamarana lake deplasmanske forme malo razlikuje od utjecaja istog na jednotrupni brod (osim kod odnosa  $s/L=0,2$ ), no rezultati se uvelike razlikuju kada se uzme u obzir stvarna dinamička oplakana površina umjesto statičke. Povećanjem Froudeovog broja, odnosno povećanjem brzine katamarana, povećava se dinamička oplakana površina stoga raste i otpor trenja, a smanjuje se preostali otpor.

Takva preraspodjela komponenata otpora utjecat će na predviđenu potrebnu snagu broda.

Iako se dinamička oplakana površina poludeplasmanskih i gliserskih formi katamarana smanjuje porastom brzine, javljaju se slični problemi kao i kod deplasmanske forme. Na manjim omjerima  $s/L$  dolazi do izraženije interferencije valova pa će na unutarnjim stranama trupova katamarana vodna linija biti viša i imat će drugačiji oblik nego na vanjskim stranama. To će utjecat na koeficijente otpora pa i na silu otpora broda.

Ako se vodna linija odnosno oplakana površina katamarana određuje analizom fotografija bazenskih ispitivanja potrebno je analizirati i fotografije vodne linije koja se generira na unutarnjim stranama trupova što otežava proces računanja dinamičke oplakane površine.

## 5. ZAKLJUČAK

Iako dinamičke vrijednosti oplakane površine znatnije utječu na otpor deploasmanskih nego poludeplasmanskih i gliserskih formi, kako bi predviđene karakteristike otpora broda bile što točnije potrebno je i oplakanu površinu što točnije odrediti. Uobičajena metoda analize fotografija bazenskih ispitivanja daje zadovoljavajuće rezultate, a relativno male pogreške koje se mogu u tom procesu dogoditi ne utječu znatnije na rezultate. Iako postoje brojni algoritmi i računalni programi koji uvelike olakšavaju sam proces analize fotografija, veliki utjecaj na točnost očitavanja ima stručnost i iskustvo osobe koja to radi.

Kod poludeplasmanskih formi trupa broda pogreška u očitavanju dinamičke oplakane površine porastom brzine imat će sve veći utjecaj na koeficijent ukupnog otpora modela. Drugim riječima netočno očitavanje vodne linije pri većim će brzinama uzrokovati veću pogrešku očitane oplakane površine modela.

Ekstrapolacijom rezultata na brod vidljivo je da dinamička oplakana površina ima veći utjecaj na ukupni otpor pri manjim brzinama. Obzirom da su sile otpora pri manjim brzinama manje, vrijednost oplakane površine imat će veći utjecaj na ukupnu pogrešku. Preostali otpor čini gotovo 80 % ukupnog otpora broda te pogreške u očitavanju oplakane površine koje utječu na otpor trenja broda neće imati veliki utjecaj na netočnost ukupnog otpora broda.

Ukratko je opisan utjecaj dinamičke oplakane površine na otpor katamarana. Dinamička oplakana površina ima značajniji utjecaj na rezultate ukupnog otpora broda jedino kod manjih udaljenosti između trupova, jer dolazi do interferencije valova.

## LITERATURA

- [1] Allenström, B., Chodorowski, A., Rambech, H.J., Tukker, J., „Determination of wetted surface“, ATM'09 Proceedings – The 1st International Conference on Advanced Model Measurment Technology for the EU Maritime Industry, Nantes, 2009.
- [2] Wikipedia – Live-wire Segmentation Technique  
([www.wikipedia.org/wiki/Livewire\\_Segmentation\\_Technique](http://www.wikipedia.org/wiki/Livewire_Segmentation_Technique))
- [3] Wikipedia – Sobel operator  
([www.wikipedia.org/wiki/Sobel\\_operator](http://www.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator))
- [4] Perez-Macias Martin, J. M., „Estimating wetted area of a model-hull from a set of camera images using, NURBS curves and surfaces“, M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2009.
- [5] ITTC Recomendated Procedures and Guidelines, <http://ittc.sname.org/>
- [6] Mjerenja otpora i propulzije višenamjenske brodice, Interni izvještaj, Brodarski institut, Zagreb, 1997.
- [7] Rhino 4.0 Manual, [www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com)
- [8] Faltinsen, O. M., „Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles“, Cambrige University Press, 2005.
- [9] Millward, A., Askew, K.M., Whattam, P., „An investigation into the effect of running wetted surface area on the resistance components of a catamaran“, International Shipbuilding Progress, vol. 48, no. 2, 2001, pp. 135-148.